

НАЦИОНАЛЕН ВОЕНЕН УНИВЕРСИТЕТ “ВАСИЛ ЛЕВСКИ”



ФАКУЛТЕТ “СИГУРНОСТ И ОТБРАНА”

КАТЕДРА “ИНЖЕНЕРНО ОСИГУРЯВАНЕ”

Капитан Иван Атанасов Атанасов

**УСЪВЪРШЕНСТВАНЕ НА СИСТЕМАТА ЗА ИНЖЕНЕРНО-
ТЕХНИЧЕСКО ОСИГУРЯВАНЕ ПРИ АВАРИЙНО-СПАСИТЕЛНИ
ДЕЙНОСТИ**

АВТОРЕФЕРАТ

**на дисертация за получаване на образователна и научна степен
„ДОКТОР”**

Област на висшето образование 5. “Технически науки”

Професионално направление 5.13. “Общо инженерство”

Докторска програма: „Строителни, пътни и специални машини”

Велико Търново

2026 г.

НАЦИОНАЛЕН ВОЕНЕН УНИВЕРСИТЕТ “ВАСИЛ ЛЕВСКИ”



ФАКУЛТЕТ “СИГУРНОСТ И ОТБРАНА”

КАТЕДРА “ИНЖЕНЕРНО ОСИГУРЯВАНЕ”

Капитан Иван Атанасов Атанасов

**УСЪВЪРШЕНСТВАНЕ НА СИСТЕМАТА ЗА ИНЖЕНЕРНО-
ТЕХНИЧЕСКО ОСИГУРЯВАНЕ ПРИ АВАРИЙНО-СПАСИТЕЛНИ
ДЕЙНОСТИ**

АВТОРЕФЕРАТ

**на дисертация за получаване на образователна и научна степен
„ДОКТОР”**

Област на висшето образование 5. “Технически науки”

Професионално направление 5.13. “Общо инженерство”

Докторска програма: „Строителни, пътни и специални машини”

НАУЧЕН РЪКОВОДИТЕЛ

полк. доц. д-р инж. Иван Георгиев Иванов

Велико Търново

2026 г.

Дисертационният труд е обсъден и насрочен за защита на 09.03.2026 г. на катедрен съвет в катедра “Инженерно осигуряване” от факултет “Сигурност и отбрана” на Национален военен университет “Васил Левски”, по докторска програма “Строителни, пътни и специални машини”.

Дисертационният труд е с обем – 120 стр.

Приложения – 5 броя с обем – 10 стр.

Илюстрации – 6 броя.

Таблицы – 9 броя.

Брой на литературните източници – 72 броя.

Публикации – 4 броя.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 09.03.2026 г. от 11.00 часа в учебен кабинет № 2303, трети етаж, втори учебен корпус на факултет „Сигурност и отбрана“ в Национален военен университет „Васил Левски“, район Велико Търново.

Материалите по защитата са на разположение на интересувашите се в Института за научноизследователска и иновационна дейност на Национален военен университет „Васил Левски“.

Авторът на дисертационния труд е докторант чрез самостоятелна подготовка в катедра “Инженерно осигуряване” от факултет “Сигурност и отбрана” на Национален военен университет “Васил Левски”.

Докторантът работи като асистент в катедра “Инженерно осигуряване” на Национален военен университет “Васил Левски”.

Автор капитан Иван Атанасов Атанасов

Заглавие: “Усъвършенстване на системата за инженерно-техническо осигуряване при аварийно-спасителни дейности”.

Тираж: __ бр.

Отпечатан на __. __. 2026 г.

Издателски комплекс на НВУ “Васил Левски”, гр. Велико Търново

І. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

АКТУАЛНОСТ НА ПРОБЛЕМА

Актуалността на дисертационния труд произтича от нарастващата честота и мащаб на природни бедствия и техногенни аварии, съпроводени със значителни човешки жертви и материални щети, което налага непрекъснато усъвършенстване на системите за управление при кризи и защита на населението. В тези условия аварийно-спасителните дейности се характеризират с висока динамика, кратки срокове за реагиране и необходимост от надеждно функциониране на инженерната техника в екстремна среда.

Съвременните аварийно-спасителни операции изискват инженерните машини да поддържат висока функционална готовност при наличие на разрушена инфраструктура, неблагоприятни климатични въздействия, ограничени логистични ресурси и повишен оперативен риск. Практиката показва, че отказите на инженерната техника по време на аварийно-спасителни дейности водят до сериозни забавяния, компрометиране на операциите и увеличаване на риска за спасителните екипи и населението.

В този контекст инженерно-техническото осигуряване се утвърждава като ключов елемент от системата за реагиране при бедствия. То не се свежда единствено до извършване на ремонтни дейности, а представлява интегриран процес, обхващащ диагностика, техническо обслужване, управление на ресурсите, мобилна логистика и оценка на риска през целия жизнен цикъл на инженерната техника.

Динамичното развитие на инженерните машини – от масивни механични конструкции към мобилни, цифровизирани и модулни системи – променя изискванията към тяхната поддръжка и възстановяване. Съвременният инженерен подход поставя акцент не толкова върху свръхздравината на конструкцията, колкото върху способността за бързо възстановяване на работоспособността в полеви условия. Това налага разработването и прилагането на нови модели за оценка на функционалната надеждност и ефективността на инженерно-техническото осигуряване.

Целта на дисертационния труд е изследване на съществуващи методи за оценка ефективността на инженерните машини при аварийно-спасителни дейности, чрез разработване на структурни модели и определяне на коефициенти повишаващи ефективността на цялата система.

Основни задачи:

- да се изследва и анализира влиянието на подвижните ремонтни средства върху ефективността на системата за инженерно – техническо осигуряване.;
- да се изследва и анализира влиянието на техническото обслужване и диагностиката върху ефективността на използваната техника в аварийно – спасителните дейности;
- да се предложат методики за усъвършенстване системата от инженерни машини чрез използването на подвижни ремонтни средства.

Обект на изследване в дисертационния труд са представителите на подвижните ремонтни средства.

Предмет на изследване са влияещите характеристики и основни показатели за усъвършенстване на системата за инженерно – техническо осигуряване при аварийно – спасителни дейности..

Постигането на целта и решаването на задачите на научното изследване е посредством използване **методите** на системния и структурно-функционалния анализ, структурното и математическото моделиране, методите на математическата статистика и нормализация на данни, многокритериалните и интегралните оценъчни методи,

сравнителният анализ на ефективността, както и теоретичният (дедуктивен) и аналитичният метод.

За по-голяма конкретност и значимост на изследванията същите са извършени при определени **допустими ограничения**:

➤ Разглеждат се единствено различните подвижни средства за ремонт на инженерни машини и тяхното влияние върху системата от инженерни машини.

II. СТРУКТУРА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Структура на дисертационния труд

Разработването на дисертационния труд е насочено към изпълнение на поставената научноизследователска цел и произлизащите от нея изследователски задачи. Анализът е концентриран към обекта и предмета на изследване в съответствие с формулираната изследователска теза и поставените ограничения. В тази връзка, дисертационният труд се състои от въведение, три раздела със съответните изводи към тях, общи изводи, заключение, научни приноси, научни-приложни приноси, речник на използваните съкращения, списък с използваната литература и списък на приложенията.

РАЗДЕЛ ПЪРВИ

ПОСТАНОВКА НА ИЗСЛЕДОВАТЕЛСКАТА ЗАДАЧА

1.1. Историческо развитие на инженерните машини и спасителната техника

Анализът на развитието на инженерните машини и спасителната техника показва устойчива тенденция за преминаване от решения, основани предимно на ръчен труд и ограничена механизация, към комплексни инженерни системи с висока степен на мобилност, автономност и функционална надеждност. В ранните етапи ефективността на аварийно-спасителните дейности е силно зависима от човешкия фактор, а възможностите за поддържане и възстановяване на техниката в зоната на бедствието са ограничени.

Развитието на тежката инженерна механизация след Втората световна война води до значително повишаване на производителността и мащаба на изпълняваните дейности, но същевременно разкрива ограничения, свързани с ниска автономност и зависимост от стационарни ремонтни бази. Това определя необходимостта от нов подход, при който надеждността не се постига единствено чрез конструктивна здравина, а чрез възможност за бързо техническо възстановяване.

В съвременния етап развитието на инженерната техника е насочено към интегриране на цифрови технологии, модулни конструктивни решения и системи за диагностика в реално време. Този преход обуславя нарастващата роля на подвижните средства за техническо обслужване и ремонт, които се превръщат в ключов елемент за поддържане на функционалната готовност на инженерните машини при аварийно-спасителни дейности. Така историческото развитие логично води до необходимостта от

усъвършенстване на системата за инженерно-техническо осигуряване като интегриран и адаптивен процес.

1.2. Анализ на опасностите и бедствията, оказващи влияние върху инженерните машини при аварийно-спасителни дейности

Анализът на опасностите и бедствията, оказващи влияние върху инженерните машини при аварийно-спасителни дейности, показва, че ефективността на използваната техника е пряко зависима от характера, интензивността и пространствено-времените параметри на кризисните събития. Инженерната техника функционира в условия на разрушена инфраструктура, нестабилен терен, неблагоприятни климатични въздействия и повишен оперативен риск, което създава предпоставки за ускорено износване, функционални откази и намалена надеждност.

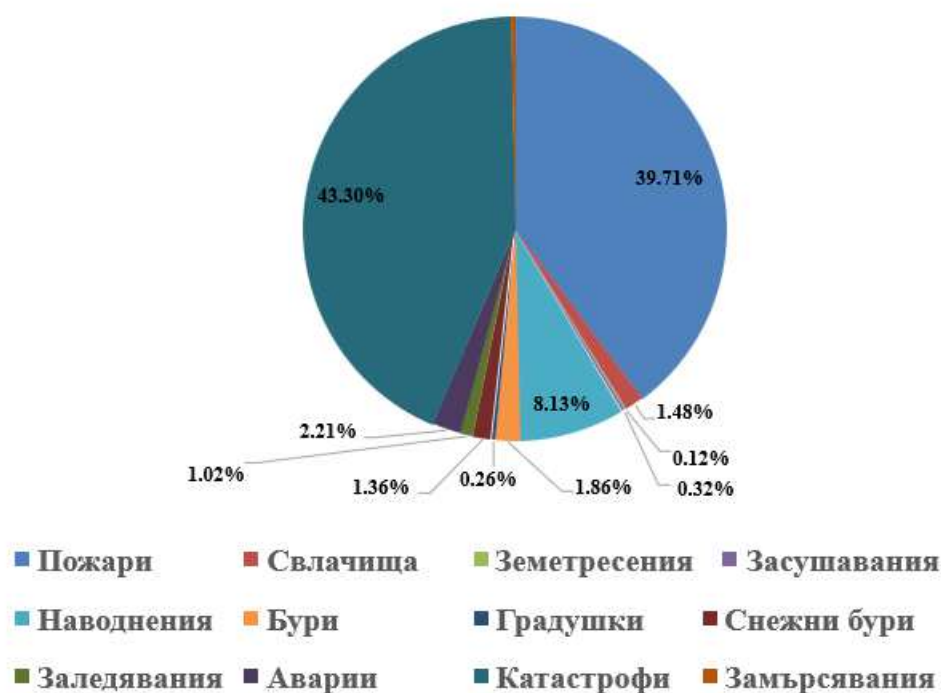
В зависимост от произхода си бедствията и опасностите могат да бъдат класифицирани като природни, антропогенни и комбинирани. Природните бедствия включват наводнения, земетресения, свлачища, пожари, снежни бури и екстремни метеорологични явления, които оказват директно въздействие върху проходимостта, устойчивостта и работоспособността на инженерните машини. Антропогенните опасности са свързани с промишлени аварии, транспортни инциденти, замърсявания и наличие на опасни материали, като при тях рискът често се усложнява от комбинираното въздействие на технологични и природни фактори.

Особено значение за оценката на въздействието върху инженерната техника има честотата и разпределението на бедствията на национално ниво. Статистическите данни за Република България показват висока интензивност на кризисни събития с различен характер, което определя необходимостта от инженерни машини с висока функционална готовност и способност за продължителна работа в автономен режим.

Таблица 1. Брой бедствия по вид за периода 2013 – 2023 г.

№	Вид кризисно събитие	Брой
1.	Пожари	17 252
2.	Свлачища	643
3.	Земетресения	51
4.	Засушавания	96
5.	Наводнения	3 533
6.	Бури, торнадо, смерч, вихрушка	806
7.	Градушки	115
8.	Снежни бури (снегонавяване)	589
9.	Залежавания, измръзвания	445
10.	Аварии	962
11.	Катастрофи с превозни средства	18 810

12.	Замърсявания (с химически вещества, с опасни отпадъци, с битови отпадъци и други)	138
13.	Други кризисни бедствия и събития	82
ОБЩО възникнали бедствия		43 522



Фигура №2 – Процентно съотношение на бедствията на територията на РБ

Анализът на данните показва доминиране на пожари, наводнения и транспортни инциденти, което поставя повишени изисквания към инженерната техника по отношение на проходимост, устойчивост на термични и хидроложки въздействия, както и възможност за бързо възстановяване след частични повреди. В тези условия отказите на отделни агрегати или системи могат да доведат до съществени забавяния в аварийно-спасителните операции и до увеличаване на риска за личния състав.

Важен елемент от анализа е идентифицирането на критичните фактори, които влияят върху работоспособността на инженерните машини в бедствена среда. Към тях се отнасят механичните натоварвания, въздействието на вода, прах и агресивни вещества, температурните колебания, както и ограниченията в логистичното и ремонтното осигуряване. Взаимодействието между тези фактори налага прилагането на системен подход за оценка на риска, който да отчита не само вероятността от възникване на отказ, но и последствията от него за цялостното изпълнение на аварийно-спасителните дейности.

Извършеният анализ обосновава необходимостта от интегриране на методи за функционална безопасност, диагностика и управление на риска в системата за инженерно-техническо осигуряване. Това създава предпоставки за своевременно идентифициране на уязвимостите, ограничаване на вероятността от критични откази и

повишаване на устойчивостта на инженерната техника при аварийно-спасителни дейности.

1.3. Основни задачи и принципи на инженерно-техническото осигуряване при аварийно-спасителни дейности

Инженерно-техническото осигуряване при аварийно-спасителни дейности представлява организирана система от мероприятия, насочени към поддържане и възстановяване на работоспособността на инженерната техника, използвана при действия в условия на бедствия, аварии и катастрофи. Неговата роля е пряко свързана с гарантирането на оперативната готовност, безопасността и непрекъсваемостта на инженерните формирования в динамична и рискова среда.

Основните задачи на инженерно-техническото осигуряване произтичат от необходимостта за своевременно реагиране и ефективно използване на инженерната техника при ограничени ресурси и висока степен на неопределеност. Към тях се отнасят диагностиката и оценката на техническото състояние на машините, организирането и извършването на текущи и аварийни ремонти, техническата евакуация на повредена техника, както и осигуряването и управлението на запасни части, инструменти и консумативи. Съществено място заема и осигуряването на енергийни, водоснабдителни и комуникационни ресурси, необходими за автономна работа в зоната на бедствието.

Ефективното изпълнение на тези задачи се основава на прилагането на определени принципи, които определят организацията и функционирането на инженерно-техническото осигуряване. Водещ принцип е поддържането на висока техническа готовност на инженерната техника, което изисква непрекъснат контрол на състоянието и своевременно извършване на техническо обслужване и ремонт. Друг основен принцип е минимизирането на времето за възстановяване на работоспособността, тъй като забавянията в ремонтните дейности могат да доведат до съществени оперативни загуби при аварийно-спасителни операции.

В условията на бедствия особено значение придобива принципът на автономност, който предполага възможност за извършване на техническо обслужване и ремонт в полеви условия, без зависимост от стационарна инфраструктура. Това налага използването на подвижни средства за техническо обслужване и ремонт, способни да осигурят диагностика, ремонт и снабдяване в непосредствена близост до мястото на действие. Допълващ принцип е интеграцията между инженерно-техническото осигуряване и логистичните процеси, която позволява оптимално управление на ресурсите и координация между различните елементи на системата.

Анализът на задачите и принципите на инженерно-техническото осигуряване показва, че неговата ефективност не се определя единствено от наличието на технически средства, а от степента на тяхната организираност, адаптивност и съгласуваност с оперативните изисквания на аварийно-спасителните дейности. Това обосновава необходимостта от усъвършенстване на системата за инженерно-техническо осигуряване чрез прилагане на системен подход, основан на оценка на риска, функционалната надеждност и оптимизацията на ремонтно-възстановителните процеси.

1.4. Структура, средства и организация на инженерно-техническото осигуряване при аварийно-спасителни дейности

Структурата и организацията на инженерно-техническото осигуряване при аварийно-спасителни дейности се определят от необходимостта за осигуряване на непрекъсната техническа готовност на инженерната техника в условия на динамична оперативна среда, разрушена инфраструктура и ограничени ресурси. Системата на инженерно-техническото осигуряване обхваща съвкупност от организационни, технически и логистични елементи, функциониращи в тясна взаимовръзка с цел поддържане и възстановяване на работоспособността на използваните машини и средства.

В структурно отношение инженерно-техническото осигуряване включва различни нива и звена, които осигуряват техническа диагностика, обслужване, ремонт и снабдяване с материални ресурси. В зависимост от мащаба и характера на аварийно-спасителните дейности тези функции могат да се изпълняват от стационарни и подвижни ремонтни формирования, като в условията на бедствия водещо значение придобиват подвижните средства за техническо обслужване и ремонт. Те позволяват извършване на диагностични и ремонтни дейности в непосредствена близост до мястото на действие, което съществено намалява времето за възстановяване на работоспособността.

Средствата за инженерно-техническо осигуряване включват подвижни ремонтни работилници, диагностична апаратура, инструменти, резервни части, енергийни и осветителни средства, както и транспортни средства за техническа евакуация. Тяхната конфигурация и степен на оборудване се определят от вида на използваната инженерна техника, очакваните натоварвания и спецификата на оперативната среда. Ефективното използване на тези средства изисква предварително планиране, стандартизиране на оборудването и ясно разпределение на функциите между отделните звена.

Таблица 2. Фазов подход при организация на ИТО

Етап	Дейност
Подготовка	Анализ на рискове, разпределение на сили и средства, планиране на маршрути и ресурси
Развръщане	Изграждане на бази за поддръжка, разполагане на ремонтни групи, осигуряване на комуникация
Изпълнение	Непрекъсната техническа поддръжка, възстановяване на повредени системи и техника
Завършване	Техническа инспекция, отчет и анализ на използваните ресурси и ефективността

Организацията на инженерно-техническото осигуряване при аварийно-спасителни дейности се основава на фазов подход, който обхваща етапите на подготовка, развръщане, функциониране и възстановяване. В рамките на този подход се осигурява последователност и координация на техническите дейности, като се отчитат динамичните промени в обстановката и приоритетите на спасителните операции. Особено значение има гъвкавостта на организацията, която позволява адаптиране на ремонтно-възстановителните процеси спрямо конкретните условия и възникналите технически проблеми.

Анализът на структурата, средствата и организацията на инженерно-техническото осигуряване показва, че неговата ефективност зависи не само от

наличието на технически ресурси, а от степента на тяхната интеграция, мобилност и съгласуваност с оперативните задачи. Това обуславя необходимостта от усъвършенстване на организационните модели и от прилагане на системен подход при планирането и управлението на инженерно-техническото осигуряване в аварийно-спасителните дейности.

ИЗВОДИ ОТ РАЗДЕЛ ПЪРВИ

1. В анализираните източници съществува ограничена информация за използване на подвижни ремонтни средства при ликвидиране на последствията от бедствия, аварии и катастрофи.

2. В недостатъчна степен е разгледан метода за оценяване на влиянието на режима на техническите обслужвания върху ефективността на използване на инженерната техника.

3. Не е разработен критерий и критериални модели за определяне на инженерно – техническата ефективност и дефиниране на параметри на системата за инженерно – техническо осигуряване при аварийно – спасителни дейности.

РАЗДЕЛ ВТОРИ

ФАКТОРИ, ВЛИЯЕЩИ ВЪРХУ РАБОТОСПОСОБНОСТТА И ФУНКЦИОНАЛНАТА БЕЗОПАСНОСТ НА ПОДВИЖНИТЕ СРЕДСТВА ЗА ТЕХНИЧЕСКО ОБСЛУЖВАНЕ И РЕМОНТ ПРИ АВАРИЙНО-СПАСИТЕЛНИ ДЕЙНОСТИ

2.1. Класификация и функционална роля на подвижните средства за техническо обслужване и ремонт в аварийно-спасителните дейности

Подвижните средства за техническо обслужване и ремонт заемат ключово място в системата на инженерно-техническото осигуряване при аварийно-спасителни дейности, тъй като осигуряват възможност за поддържане и възстановяване на работоспособността на инженерната техника в условията на разрушена инфраструктура и ограничен достъп до стационарни ремонтни бази. Тяхната функционална роля е пряко свързана с намаляване на времето за възстановяване, повишаване на автономността и поддържане на висока оперативна готовност на инженерните формирования.

В зависимост от предназначението, нивото на оборудване и обхвата на изпълняваните дейности подвижните средства за техническо обслужване и ремонт могат да бъдат класифицирани по няколко основни признака. Един от основните критерии е функционалното им предназначение, при което се разграничават средства за техническа диагностика, за текущ ремонт, за възстановителен ремонт и за комплексно обслужване. Тази класификация позволява оптимално разпределение на ресурсите в зависимост от характера на възникналите повреди и оперативните изисквания на аварийно-спасителните дейности.

Друг съществен признак за класификация е степента на мобилност и автономност на подвижните средства. В този аспект се обособяват средства, изградени върху автомобилни шасита, ремаркета или модулни платформи, които могат да бъдат бързо развърнати в зоната на бедствието и да функционират

продължително време без външно снабдяване. Автономността на тези средства се определя от наличието на енергийни източници, резервни части, инструменти и диагностично оборудване, необходими за извършване на ремонтни дейности в полеви условия.

Таблица 3. Класификация на ПСТОР

Критерий за класификация	Категории/видове ПСТОР	Характеристика
По предназначение	- Общо предназначение - Специализирани	Универсални за широк спектър ремонти Оптимизирани за конкретна техника (пожарни автомобили, хидравлика, СДОД, генератори и др.)
По конструктивна платформа (шаси)	- Товарни автомобили - Микробуси/ванове - Контейнерни/модулни	Различават се по мобилност, капацитет на оборудване и автономност; контейнерните осигуряват най-голяма гъвкавост
По функционална специализация на ремонта	- Механични - Електротехнически - Хидравлични - Заваръчни - Комбинирани	Оборудвани според най-честите откази на техниката; комбинираните позволяват изпълнение на множество видове ремонтни дейности
По степен на автономност	- Ограничена автономност - Средна автономност - Висока автономност	Зависими от външни ресурси Частично автономни Напълно автономни с агрегати, компресори и резервни течности
По времеви профил на използване	- За бързо реагиране - За продължителни операции	Използват се в началните фази на инцидента Използват се при мащабни и продължителни аварийно-спасителни действия

Функционалната роля на подвижните средства за техническо обслужване и ремонт се изразява не само в извършването на конкретни ремонтни операции, но и в осигуряването на техническа диагностика, превантивна поддръжка и логистична поддръжка на инженерната техника. Чрез своевременно откриване и отстраняване на частични повреди се предотвратява ескалацията на отказите и се намалява рискът от пълна загуба на работоспособност в критични етапи на аварийно-спасителните операции.

Анализът на класификацията и функционалната роля на подвижните средства за техническо обслужване и ремонт показва, че тяхната ефективност зависи от степента на съответствие между възможностите на средствата и реалните потребности на инженерната техника в конкретната оперативна среда. Това обуславя необходимостта от оценка на вътрешните и външните фактори, влияещи върху тяхната работоспособност и функционална безопасност.

2.2. Вътрешни фактори, определящи работоспособността на инженерните машини

Работоспособността на инженерните машини при аварийно-спасителни дейности се определя в значителна степен от съвкупността на вътрешните технически фактори, заложи в тяхната конструкция, експлоатационни характеристики и степен на техническо състояние. Тези фактори оказват пряко влияние върху надеждността, безопасността и способността на машините да изпълняват поставените задачи в условия на повишени натоварвания и ограничени ресурси.

Към основните вътрешни фактори се отнасят конструктивните особености на машините, включително здравината и устойчивостта на носещите елементи, качеството и надеждността на силовите агрегати, трансмисиите и работните органи, както и степента на модулност и ремонтпригодност. Конструктивните решения, които улесняват достъпа до възли и агрегати и позволяват бърза подмяна или ремонт, са от съществено значение за поддържане на работоспособността в полеви условия.

Съществен вътрешен фактор е техническото състояние на машините, което се определя от степента на износване на основните възли, наличието на скрити дефекти и състоянието на системите за управление и безопасност. Недостатъчната или несвоевременна техническа диагностика може да доведе до възникване на откази в критични моменти, което компрометира изпълнението на аварийно-спасителните операции.

Значителна роля играят и вътрешните експлоатационни параметри, свързани с режимите на работа, натоварванията и взаимодействието между отделните системи на машината. В условията на аварийно-спасителни дейности инженерните машини често работят извън номиналните си режими, което ускорява износването и увеличава вероятността от функционални откази. Това налага повишени изисквания към системите за контрол, диагностика и управление на техническото състояние.

Анализът на вътрешните фактори показва, че работоспособността на инженерните машини не е статична величина, а динамичен показател, който се изменя в зависимост от техническото състояние, режимите на експлоатация и ефективността на поддръжката. Това обуславя необходимостта от прилагане на системен подход към техническата диагностика и управлението на техническото състояние, който да осигури своевременно откриване на деградационни процеси и предотвратяване на критични откази.

2.3. Външни фактори и заплахи в условията на природни бедствия и антропогенни инциденти

Външните фактори и заплахи оказват съществено влияние върху работоспособността и функционалната безопасност на инженерните машини при аварийно-спасителни дейности. За разлика от вътрешните фактори, които са свързани с конструкцията и техническото състояние на машините, външните фактори се определят от характеристиките на средата, в която се извършват спасителните операции, и често са с променлив и трудно прогнозируем характер.

Към основните външни фактори се отнасят климатичните и метеорологичните условия, включително екстремни температури, валежи, вятър, снеговалежи и залежавания, които влияят върху проходимостта, сцеплението, охлаждането и работата на силовите и хидравличните системи. В условията на наводнения, пожари и свлачища

инженерните машини са подложени на въздействието на вода, кал, прах, агресивни химични вещества и високи температури, което увеличава риска от ускорено износване и внезапни откази.

Съществен външен фактор представлява състоянието на инфраструктурата в зоната на бедствието. Разрушени пътища, мостове и комуникации ограничават достъпа на инженерната техника и затрудняват извършването на техническо обслужване и ремонт. Това налага използването на машини с повишена проходимост и автономност, както и на подвижни средства за техническо обслужване и ремонт, способни да функционират при липса на стационарна инфраструктура.

Антропогенните инциденти, като промишлени аварии, транспортни катастрофи и замърсявания с опасни вещества, създават допълнителни рискове за инженерната техника и обслужващия персонал. Наличието на токсични, взривоопасни или радиоактивни вещества изисква използването на специализирани защитни средства и ограничава времето за работа в зоната на инцидента, което оказва пряко влияние върху организацията на инженерно-техническото осигуряване.

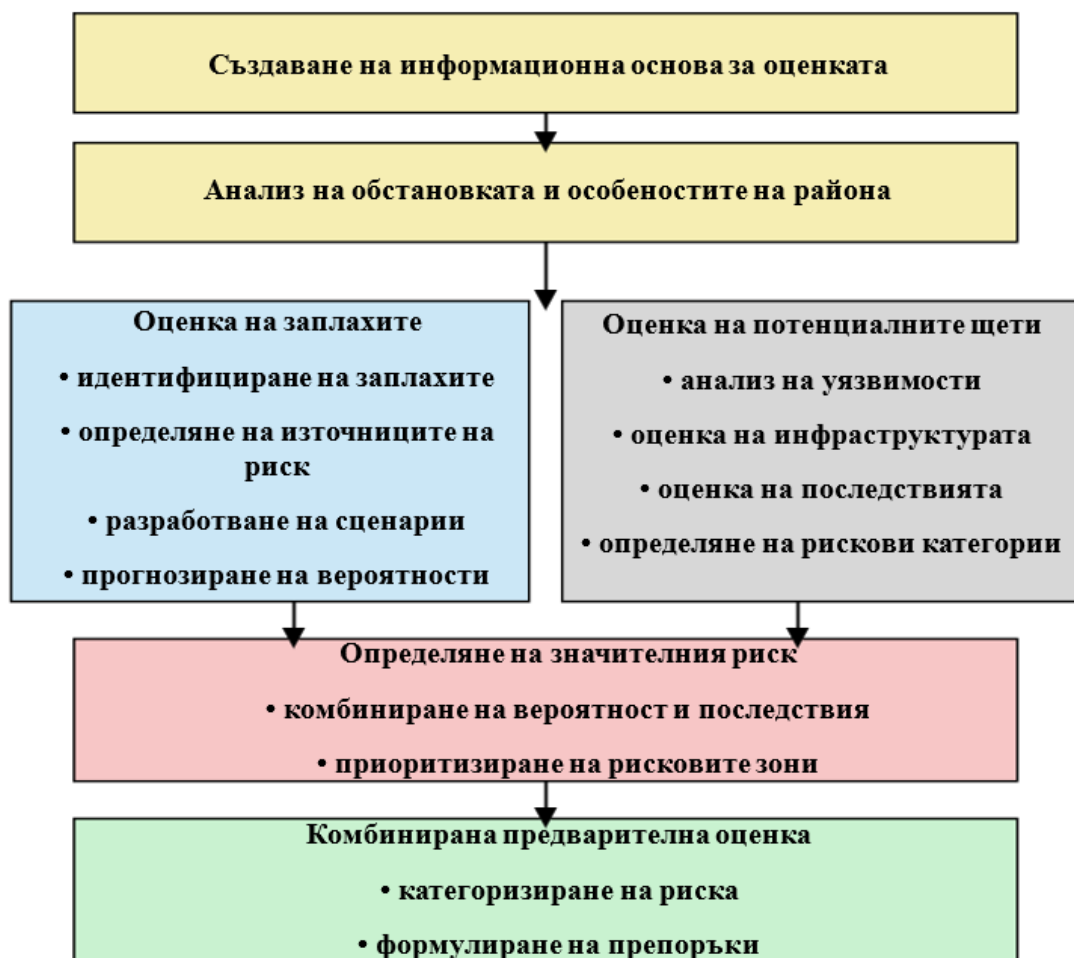
Анализът на външните фактори и заплахи показва, че тяхното въздействие върху инженерните машини е комплексно и често комбинирано, което затруднява прилагането на стандартни подходи за поддръжка и ремонт. Това обуславя необходимостта от интегриране на методи за оценка на риска и функционалната безопасност, които да отчитат влиянието на средата и да подпомагат вземането на решения за поддържане на работоспособността на техниката при аварийно-спасителни дейности.

2.4. Методологии за техническа диагностика и оценка на риска на инженерните машини

Техническата диагностика и оценката на риска представляват основни елементи от системата за инженерно-техническо осигуряване при аварийно-спасителни дейности, тъй като осигуряват своевременно идентифициране на отклоненията в техническото състояние на инженерните машини и предотвратяване на функционални откази в критични етапи на операцията. В условията на повишена динамика и ограничено време диагностичните процеси следва да бъдат насочени към бързо и надеждно определяне на работоспособността и остатъчния ресурс на основните възли и агрегати.

Методологиите за техническа диагностика включват визуални, инструментални и функционални методи, чрез които се оценява състоянието на конструктивните елементи, силовите, хидравличните и електронните системи на инженерните машини. Визуалната диагностика позволява бързо откриване на видими повреди, течове и деформации, докато инструменталните методи осигуряват по-точна оценка на параметри като налягане, температура, вибрации и електрически характеристики. Функционалните изпитвания допълват диагностичния процес чрез проверка на работата на системите в реални или близки до реалните режими на експлоатация.

Оценката на риска при експлоатацията на инженерните машини се основава на анализ на вероятността за възникване на отказ и на тежестта на неговите последствия за аварийно-спасителните дейности. В този контекст се прилагат методи за идентифициране на критичните възли и процеси, както и за класифициране на рисковете в зависимост от тяхната значимост. Интегрирането на резултатите от техническата диагностика в процеса на оценка на риска позволява вземането на обосновани решения относно необходимостта от ремонт, подмяна или временно изваждане от експлоатация на отделни машини.



Фигура № 3. Структуриран процес за оценка на опасностите, уязвимостите и комбиниания риск

Анализът на методологиите за техническа диагностика и оценка на риска показва, че тяхната ефективност зависи от степента на интеграция в общата система за инженерно-техническо осигуряване. Прилагането на системен подход, който обединява диагностичните резултати, оценката на риска и планирането на ремонтно-възстановителните дейности, създава предпоставки за повишаване на функционалната надеждност и безопасността на инженерните машини при аварийно-спасителни дейности.

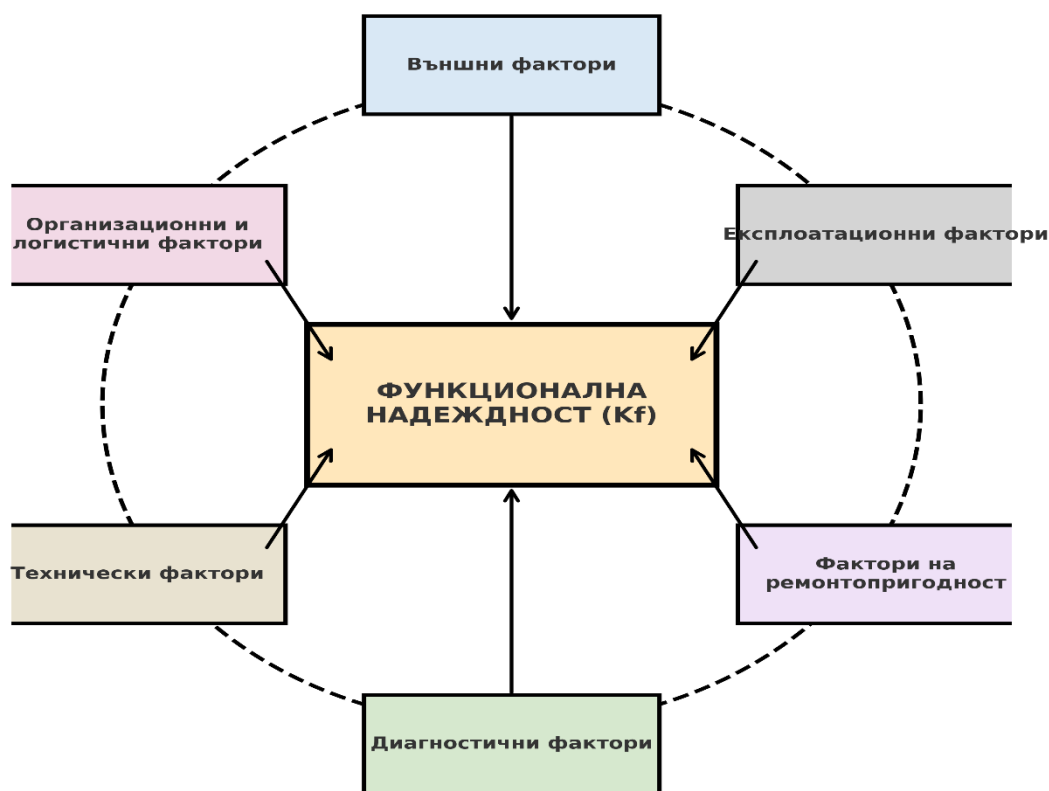
2.5. Интегриран модел на влияещите фактори върху функционалната надеждност

Интегрираната оценка на факторите, влияещи върху функционалната надеждност на инженерната техника при аварийно-спасителни дейности, изисква системно разглеждане на вътрешните параметри на машината, външната оперативна среда и рисковите въздействия, които действат едновременно и в динамична взаимовръзка. Практиката показва, че отказите рядко са резултат от единичен фактор, а

възникват вследствие на комбинирания и синергичен ефект на конструктивни, експлоатационни и средови влияния.

Функционалната надеждност на инженерната техника в условията на бедствия следва да се разглежда като динамичен баланс между потенциала на машината да поема натоварване и темпа на деградация на нейните системи под въздействието на външната среда. В този смисъл оценката на надеждността не може да бъде статична или базирана единствено на паспортен ресурс, а следва да отчита текущото техническо състояние, условията на експлоатация и ефективността на техническата поддръжка.

Анализът на предходните подраздели показва, че въздействието върху работоспособността на инженерната техника се реализира чрез три основни групи фактори: вътрешни фактори, отразяващи структурно-техническото състояние и остатъчния ресурс; външни фактори, обусловени от характеристиките на оперативната среда и бедствените въздействия; и рискови фактори, свързани с вероятността и критичността на отказите в отделните възли и агрегати. Ключовият проблем в практиката е не наличието на отделен фактор, а едновременното и комбинирано влияние на тези фактори в конкретния оперативен контекст.



Фигура № 4. Радиален модел на основните фактори, влияещи върху функционалната надеждност

С оглед на това се предлага използването на интегрален коефициент на функционална надеждност K_f , който обединява вътрешните, външните и рисковите влияния, претеглени според тяхната оперативна значимост и нормализирани спрямо времевия диагностичен интервал. Формалното представяне на модела е:

$$K_f = \frac{(K_i \times w_i) + (K_e \times w_e) + (K_r \times w_r)}{T_d} \quad (2.1)$$

Където:

K_f – интегрален коефициент на функционална надеждност;

K_i – коефициент на вътрешните фактори (структурно-техническо състояние);

K_e – коефициент на външните фактори (оперативна среда и въздействия);

K_r – коефициент на рисковите фактори (диагностично определена вероятност за отказ);

w_i, w_e, w_r – теглови коефициенти, оценяващи относителната значимост на всяка група фактори за конкретната мисия;

T_d – времеви диагностичен интервал, определящ честотата на мониторинга и обновяването на данните за състоянието на машината.

Интегралния коефициент на функционална надеждност K_f позволява не само количествена оценка на текущата функционална надеждност, но и прогнозиране на изменението на работоспособността във времето, което го прави приложим инструмент за оперативно планиране, приоритизиране на техническата поддръжка и оптимизиране на използването на подвижните средства за техническо обслужване и ремонт.

ИЗВОДИ ОТ РАЗДЕЛ ВТОРИ

1. Работоспособността и функционалната надеждност на инженерната техника се формират в условия на висока динамика и неопределеност, при които въздействията върху машините се реализират едновременно чрез вътрешни технически параметри, външни физико-химични фактори и рискови въздействия, определяни посредством методи за диагностика.

2. Изолираното оценяване на техническото състояние на възлите и агрегатите е недостатъчно за надеждно прогнозиране на откази, тъй като външната оперативна среда и вероятностно-рисковите показатели оказват съществено влияние върху работния ресурс и устойчивостта на инженерната техника.

3. Функционалната надеждност следва да се разглежда като интегрален параметър, който обединява технически, средови и рискови въздействия и отчита тяхното едновременно проявление и динамика във времето, което прави статичните оценки на техническата изправност неприложими в реални аварийно-спасителни условия.

4. Обоснована е необходимостта от интегриран аналитичен подход за оценка на функционалната надеждност, позволяващ количествено представяне на състоянието, проследяване на неговата динамика и създаване на методическа основа за моделиране, прогнозиране на откази и оптимизиране на поддръжката и ресурсното осигуряване, развити в раздел трети.

РАЗДЕЛ ТРЕТИ

МОДЕЛИРАНЕ И ОПТИМИЗИРАНЕ НА ПРОЦЕСИТЕ ПО ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКО ОСИГУРЯВАНЕ ПРИ АВАРИЙНО-СПАСИТЕЛНИ ДЕЙНОСТИ

3.1. АНАЛИЗ НА ПРОБЛЕМНИТЕ ОБЛАСТИ В ЕКСПЛОАТАЦИЯТА НА ИНЖЕНЕРНАТА ТЕХНИКА

Експлоатацията на инженерната техника при аварийно-спасителни дейности се осъществява в условия, съществено различаващи се от стандартните експлоатационни режими, което води до повишени и трудно прогнозируеми натоварвания върху агрегатите, оборудването и обслужващия персонал. Комбинираното въздействие на механични, термични и химични фактори ускорява деградационните процеси и увеличава риска от функционални откази, дори при машини с номинална техническа изправност.

Анализът на експлоатационните отклонения показва, че спадът в работоспособността рядко е резултат от единичен фактор, а се дължи на кумулативния ефект от вътрешни технически ограничения, външни средови въздействия и недостатъчна адаптация на организационно-логистичните процеси към условията на конкретната мисия. В този смисъл инженерната техника следва да се разглежда като част от взаимосвързана инженерно-техническа система, в която ефективността на отделния елемент зависи от техническото му състояние, управлението, поддръжката, логистичното осигуряване и времевите ограничения на операцията.

Проблемните области в експлоатацията на инженерната техника могат да бъдат систематизирани по механизма фактор – отклонение – следствие, като от оперативна гледна точка се проявяват чрез три основни групи отклонения:

- техническо-ресурсни, свързани с ускорено износване и нестабилни режими на работа;
- средови, обусловени от агресивни физико-химични и метеорологични въздействия;
- оперативни, произтичащи от ограничения във времето, логистиката и натоварването на екипажа.

Посочените групи отклонения не действат изолирано, а формират взаимосвързана система от причини и последствия, при която въздействието върху един елемент води до верижно влошаване на общата работоспособност. Това обуславя необходимостта от структурирана идентификация на проблемните области и тяхната количествена оценка като част от цялостната система за инженерно-техническо осигуряване.

Таблица 5. Проблемни области, последствия и индикатори за измерване

Проблемна област	Оперативно следствие	Индикатор за измерване
Ускорено износване на възли и агрегати	Намалена мощност и производителност	- Темп на деградация на ресурса - Часове до достигане на критичен праг
Термично/вибрационно претоварване	Нестабилна работа под натоварване	- Температурни и вибрационни амплитуди

Проблемна област	Оперативно последствие	Индикатор за измерване
		- Отклонение от номиналните параметри
Неефективна хидравлична или енергийна система	Загуба на управляемост и функционални режими	- Пад на налягането - Нестабилност на напрежението - Консумация на гориво
Агресивна среда (химична/биологична/радиационна)	Повишен риск за екипажа и намаляване на продължителността на работа	- Нива на замърсяване време за безопасна експлоатация без защита
Неблагоприятен терен и препятствия	Ограничена маневреност и достъпност	- Скорост на придвижване - Процент непроходими участъци
Ограничена логистична поддръжка	Забавяне на работния цикъл и ремонтите	- Време за доставка на резервни части - Време за обслужване
Непълна диагностична осигуреност	Пропуски в прогнозата за отказ	- Интервал между диагностики - Точност на диагностичните сигнали
Висока натовареност на екипажа	Повишена вероятност от грешки и инциденти	- Продължителност на смяна - Коефициент на умора - Брой операторски грешки

Анализът показва, че значителна част от негативните последствия са свързани не с първичното възникване на откази, а с ограничените възможности за тяхното своевременно диагностициране, обслужване и отстраняване в зоната на аварийно-спасителните действия. Това поставя поддръжката, ремонта и възстановяването на инженерната техника в центъра на инженерно-техническото осигуряване.

С оглед на това се обосновава необходимостта от количествено измерима система от показатели за оценка на работоспособността на инженерната техника.

Съществуващата система от показатели С1–С25 не отразява в пълна степен спецификата на подвижните средства за техническо обслужване и ремонт, функциониращи в условия на ограничено време, липса на стационарна инфраструктура и повишен риск.

Поради това се предлага въвеждането на подсистема С26 „Подвижни средства за техническо обслужване и ремонт“, която надгражда съществуващата система чрез акцент върху оперативната готовност, ремонтно-възстановителния потенциал и автономното функциониране на ПСТОР. Подсистема С26 включва три функционални направления: оперативна готовност (С261), ремонтно-възстановителни дейности (С262) и автономно функциониране (С263), които осигуряват целенасочена и приложима оценка в условията на аварийно-спасителни операции.

3.2. Разработване на система от показатели за оценка на работоспособността

Ефективността на инженерната техника при аварийно-спасителни дейности изисква нейното техническо състояние и работоспособност да бъдат оценявани чрез

система от количествени показатели, които обективно отразяват влиянието на вътрешните, външните, рисковите и оперативните фактори. В условията на повишена динамика и неопределеност техническата диагностика се утвърждава като основен инструмент за получаване на надеждна информация за състоянието на инженерните машини и за вземане на своевременни решения при ограничено време и ресурси.

Анализът на съществуващите подходи показва, че класическите показатели от теорията на надеждността, основани на статистически и вероятностни методи, не са достатъчни за оценка на работоспособността на конкретна машина при конкретни аварийно-спасителни сценарии. Поради това се налага разработването на система от показатели, която да отчита не само техническата изправност, но и влиянието на средата, риска от откази и оперативните ограничения.

Разработената система от показатели е изградена на базата на принципите на информативност, чувствителност, универсалност, адаптивност и възможност за квантифициране. Показателите са групирани в четири основни категории: показатели за вътрешното техническо състояние на инженерната техника, показатели за външните средови въздействия, показатели за рисковите фактори и оперативни показатели, отразяващи логистичните и времевите ограничения на аварийно-спасителните операции.

Таблица 6. Система от показатели за оценка на работоспособността

Категории	Показател	Съдържание	Тип стойност
Вътрешно техническо състояние	P_1	Темп на износване на възли и агрегати	Нормализирана стойност (0–1)
	P_2	Стабилност на енергийните и хидравличните режими	Отклонение от номиналните параметри (%)
	P_3	Остатъчен технически ресурс	Часове до критичен ресурс
Външни средови въздействия	P_4	Агресивност на оперативната среда (хим./биол./рад.)	Класификационен индекс
	P_5	Теренни ограничения и проходимост	Делът на непроходими участъци (%)
Рискови действия	P_6	Вероятност на отказ	Вероятностна оценка (0–1)
	P_7	Критичност на отказ	Тежест на последствията (коефициент)
Оперативни фактори	P_8	Логистични и времеви закъснения	Време за обслужване спрямо норматив (%)
	P_9	Натовареност на личния състав	Индекс на умора / дължина на смяна

С цел включване на разработените показатели в интегралния математически модел, показателите от P_1 до P_9 се нормализират и интегрират чрез присвояване на теглови коефициенти $w_1 - w_9$ в зависимост от значимостта им за конкретната оперативна мисия, въвеждане на унифицирана скала за съпоставимост и възможност за динамична актуализация при промяна на експлоатационните условия. По този начин системата от показатели осигурява количествената основа за математическото

моделиране и агрегиране на отделните оценки в интегрален параметър за функционална надеждност.

За повишаване на обективността на оценката е разработена критериална оценка на ефективността на подвижните средства за техническо обслужване и ремонт, базирана на ключови експлоатационни и оперативни критерии като мобилност, автономност, ремонтпригодност, адаптивност към средата и логистична независимост. Систематизирането и параметризирането на показателите позволява формализиране на връзките между тях и изграждане на математически модел за оценка и прогнозиране на функционалната надеждност на инженерната техника в динамични условия.

3.3. Формулиране на интегрални коефициенти за оценка на инженерно-техническото осигуряване

В процеса на изследването възниква необходимост от въвеждане на количествен показател, характеризиращ оперативната ефективност на ПСТОР като елемент от системата за инженерно-техническо осигуряване. Целта е да се оцени не само наличието на ПСТОР, а реалният им принос за повишаване на готовността и устойчивостта на инженерната техника в условията на аварийно-спасителни дейности.

След анализ на възможни интегрални показатели, включващи множество експлоатационни параметри, е избран опростен и практически приложим модел, структуриран около три ключови аспекта: време за реагиране при възникване на отказ, резултатност на ремонтните дейности и автономност на работа.

Така се формулира интегрален коефициент на оперативна ефективност $K_{оп}$ който да обединява тези три направления в една обобщена числова оценка.

Интегралният коефициент на оперативна ефективност на ПСТОР се въвежда като:

$$K_{оп} \in [0; 1], \quad (3.1)$$

където:

- $K_{оп} \rightarrow 1$ – показва много висока оперативна ефективност на ПСТОР;
- $K_{оп} \rightarrow 0$ – показва много ниска оперативна ефективност.

Предлага се $K_{оп}$ да се зададе като претеглена сума на три частни нормализирани коефициента:

$$K_{оп} = w_t \cdot K_t + w_r \cdot K_r + w_a \cdot K_a, \quad (3.2)$$

където:

- K_t – коефициент, оценяващ времето за реагиране;
- K_r – коефициент, оценяващ успешността и продуктивността на ремонтите;
- K_a – коефициент, оценяващ автономността на работа;
- w_t, w_r, w_a – теглови коефициенти, отразяващи относителната важност на трите аспекта;
- $w_t + w_r + w_a = 1, w_t, w_r, w_a \geq 0$.

В най-общия случай теглата могат да се адаптират според конкретния сценарий (напр. при силно затруднена логистика – по-голямо w_a , при висока динамика на отказите – по-голямо w_t).

В базовия случай, при **равна значимост** на трите аспекта, може да се приеме:

$$w_t = w_r = w_a = \frac{1}{3} \quad (3.3)$$

т.е.:

$$K_{\text{оп}} = \frac{K_t + K_r + K_a}{3} \quad (3.4)$$

И в двата случая основният принцип е един и същ:

$K_{\text{оп}}$ обединява три нормализирани частни оценките в един интегрален показател.

Всеки от частните коефициенти е нормализиран в интервала $[0; 1]$, като:

- стойности, близки до 1, означават **благоприятно състояние** по съответния показател;

- стойности, близки до 0 – **неблагоприятно състояние**.

Коефициент на времето за реагиране K_t

Цел: да се оцени колко бързо ПСТОР реагира на заявка за ремонт.

Нека:

- T_{ϕ} – фактическо средно време за реагиране (от получаване на задачата до започване на ремонтните действия), [min];
- $T_{\text{доп}}$ – нормативно (допустимо) време за реагиране, [min].

Тогава се въвежда:

$$K_t = 1 - \frac{T_{\phi}}{T_{\text{доп}}}. \quad (3.5)$$

За избягване на некоректни стойности се въвеждат ограничения:

- ако $T_{\phi} \geq T_{\text{доп}} \rightarrow K_t = 0$ (реакцията е по-бавна от допустимото);
- ако $T_{\phi} \ll T_{\text{доп}}$ и формулата дава стойност над 1 $\rightarrow K_t$ се ограничава до 1,

т.е. реално се използва:

$$K_t = \min \left\{ 1, \max \left(0, 1 - \frac{T_{\phi}}{T_{\text{доп}}} \right) \right\}. \quad (3.6)$$

В текста може да се използва опростено обозначение K_t , като формалните ограничения се уточняват в описанието.

Коефициент на резултатност на ремонтите K_r

Цел: да се оцени какъв дял от ремонтните задачи се изпълняват успешно на място, без необходимост от повторна намеса или евакуация към стационарна база.

Нека:

- $N_{\text{общ}}$ – общ брой заявки/повреди, за които ПСТОР е ангажиран в разглеждания период;

- $N_{\text{усп}}$ – брой успешно извършени ремонти на място, при които техниката е върната в работоспособно състояние и може да продължи участие в аварийно-спасителните дейности.

Тогава:

$$K_r = \frac{N_{\text{усп}}}{N_{\text{общ}}}. \quad (3.7)$$

При:

- $K_r \rightarrow 1$ – почти всички ремонти се извършват успешно на терен;
- $K_r \rightarrow 0$ – преобладаваща част от повредите не могат да бъдат отстранени от ПСТОР.

При желание, на по-късен етап може да се включи допълнителен множител за повторни ремонти, но в рамките на настоящия труд този вид формула е достатъчен за ясно и интуитивно количествено оценяване.

Коефициент на автономност K_a

Цел: да се оцени доколко ПСТОР може да работи автономно в полеви условия, без допълнително снабдяване с гориво, резервни части, консумативи и без връщане към базата.

Нека:

- $T_{\text{авт}}$ – фактическо средно време на автономна работа (часове или денонощия), през което ПСТОР може да изпълнява задачи без допълнително снабдяване;
- $T_{\text{цел}}$ – нормативно или целево зададено време за автономна работа (цел на оптимизацията).

Тогава:

$$K_a = \frac{T_{\text{авт}}}{T_{\text{цел}}}. \quad (3.8)$$

Прилагат се следните ограничения:

- ако $T_{\text{авт}} \geq T_{\text{цел}} \rightarrow$ приема се $K_a = 1$;
- ако $T_{\text{авт}} \ll T_{\text{цел}} \rightarrow K_a$ клони към 0.

Ограничаването в интервала $[0; 1]$ осигурява съпоставимост на трите частни коефициента и улеснява интегрирането им в $K_{\text{оп}}$.

При равни тегла (или при избрани тегла в зависимост от сценария) могат да се определят **интервални зони на оценка** за $K_{\text{оп}}$:

- $K_{\text{оп}} \in [0,70; 1,00]$ – **висока оперативна ефективност** на ПСТОР;
- $K_{\text{оп}} \in [0,50; 0,69]$ – **задоволителна ефективност**, препоръчва се оптимизация на отделни елементи;
- $K_{\text{оп}} < 0,50$ – **недостатъчна ефективност**, необходима е сериозна модернизация и организационно-технически промени.

Интегралният коефициент $K_{оп}$ се дефинира като претеглена сума на три частни нормализирани коефициента:

$$K_{оп} = w_t \cdot K_t + w_r \cdot K_r + w_a \cdot K_a,$$

където K_t характеризира времето за реагиране, K_r – резултатността на ремонтите, а K_a – автономността на ПСТОР, а тегловите коефициенти отразяват тяхната относителна значимост за конкретната оперативна мисия. При равна значимост на аспектите се приема усреднена форма на показателя.

Коефициентът $K_{оп}$ се предлага като авторски интегрален показател, който изпълнява ролята на междинно звено между конкретните оперативни характеристики на ПСТОР и общата оценка на функционалната надеждност на инженерната техника.

На базата на разработената в т. 3.2 система от показатели P_1-P_9 се формира интегрален математически модел за оценка на функционалната надеждност на инженерната техника. Показателите се нормализират в интервала $[0; 1]$ и се претеглят според значимостта им за конкретния оперативен сценарий. Като допълнителен параметър се въвежда диагностичен коефициент, отчитащ влиянието на честотата на мониторинга върху вероятността за своевременно откриване на отклонения.

Интегралният коефициент на функционална надеждност се дефинира като:

$$K_f = k_d \cdot \sum_{n=1}^N (P_n^* \cdot w_n),$$

където:

- K_f – интегрален коефициент на функционална надеждност на инженерната техника;
- P_n^* – нормализирана оценка на състоянието по показател n (в диапазон 0–1);
- w_n – теглови коефициенти, отразяващи значимостта на показателите ($\sum w_n = 1$);
- k_d – диагностичен коефициент, отчитащ влиянието на честотата на мониторинга.

Получената стойност на K_f позволява бърза и обективна оценка на функционалната готовност на инженерната техника и класифициране на състоянието ѝ в зони на висока, приемлива, занижена или критична готовност.

Таблица 7. Оценка на функционалната готовност според коефициента K_f

Диапазон на K_f	Оценка на състоянието	Оперативна интерпретация
0,80 – 1,00	Висока функционална готовност	Машината е годна за продължителна работа в сложна среда
0,60 – 0,79	Приемлива готовност	Допустима за работа при контролирани условия,

		препоръчва се усилен мониторинг
0,40 – 0,59	Занижена готовност	Необходима е ограничена експлоатация, план за обслужване и ремонт
< 0,40	Критично състояние	Препоръчва се изваждане от експлоатация и незабавен ремонт

3.4. Сравнителен анализ на резултатите и оценка на ефективността на ИТО

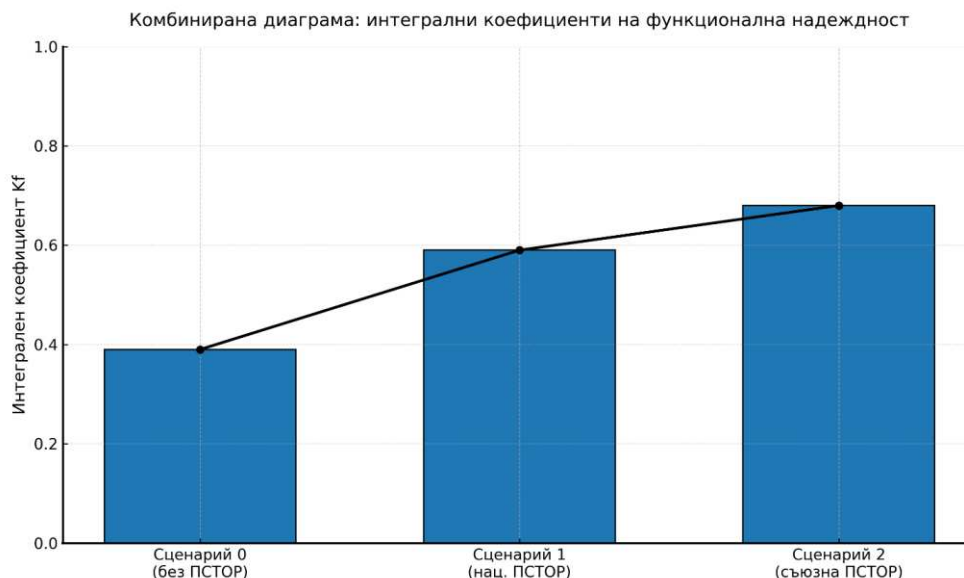
Разработеният модел осигурява гъвкавост при адаптиране към различни типове инженерна техника и аварийно-спасителни сценарии чрез промяна на тегловите коефициенти и нормализираните оценки. В същото време той запазва оперативна приложимост и може да бъде реализиран в табличен или софтуерен вид, което го прави подходящ за практическо внедряване в инженерно-техническите формирвания.

Сравнителният анализ има за цел да оцени ефективността на различни конфигурации на системата за инженерно-техническо осигуряване при аварийно-спасителни дейности чрез прилагане на интегралния коефициент на функционална надеждност K_f . Анализът позволява количествено сравнение между три типични сценария: система за ИТО без подвижни средства за техническо обслужване и ремонт, ИТО с национална ПСТОР платформа и ИТО със съюзна ПСТОР платформа от клас FRSN.

Таблица 9. Сравнение на стойностите на интегралния коефициент K_f

Сценарий	Обозначение	K_f	Оперативна оценка (качествена)	Разлика спрямо базовия сценарий
ИТО без ПСТОР	$K_f^{(0)}$	$\approx 0,39$	Стабилна работоспособност при стандартни условия; ограничена автономност и адаптивност в динамична среда	–
ИТО с национална ПСТОР (МРС-ИТ)	$K_f^{(BG)}$	$\approx 0,59$	Повишена готовност; намалена зависимост от логистичната инфраструктура; по-бързо възстановяване на техника при усложнена обстановка	$\approx +50 \%$
ИТО със съюзна ПСТОР платформа (тип FRSN)	$K_f^{(NATO)}$	$\approx 0,68$	Висока функционална надеждност; оптимална ремонтпригодност и оперативна устойчивост при динамични аварийни сценарии	$\approx +75 \%$

Получените стойности на интегралния коефициент показват ясно изразена тенденция към повишаване на функционалната надеждност при внедряване на ПСТОР. При базовия сценарий без ПСТОР е получена стойност $K_f \approx 0,39$, което съответства на ограничена функционална готовност при динамични и усложнени условия. Въвеждането на национална ПСТОР платформа (МРС-ИТ) води до повишаване на коефициента до $K_f \approx 0,59$, което представлява приблизително 50 % подобрение спрямо базовия сценарий. Най-висока стойност е отчетена при използване на съюзна ПСТОР платформа от клас FRSN – $K_f \approx 0,68$, което съответства на около 75 % повишаване на функционалната надеждност.



Фигура № 6. Комбинирана диаграма на интегралните коефициенти на функционална надеждност

Резултатите показват, че внедряването на ПСТОР съществено повишава оперативната автономност на системата за ИТО, съкращава времето за възстановяване на инженерната техника и намалява зависимостта от стационарна ремонтна инфраструктура. Получените разлики в стойностите на коефициента K_f представляват обективна количествена индикация за надграждане на системата за инженерно-техническо осигуряване, а не за нейната първоначална неефективност.

Разработеният интегрален модел демонстрира възможност за приложение както в национален, така и в коалиционен контекст и позволява обективна оценка на влиянието на подвижните средства за техническо обслужване и ремонт върху функционалната надеждност на инженерната техника при аварийно-спасителни дейности.

ИЗВОДИ ОТ РАЗДЕЛ ТРЕТИ

1. Ефективността на системата за инженерно-техническо осигуряване при аварийно-спасителни дейности се определя от съвкупното влияние на технически, външни, рискови и оперативни фактори, което налага използването на комплексен и интегриран подход за оценка на работоспособността на инженерната техника.

2. Разработената система от показатели, заедно с предложената процедура за тяхното нормализиране и обобщаване, осигурява обективна и количествено обоснована оценка на функционалната надеждност на инженерната техника в динамична и променлива оперативна среда.

3. Формулираният математически модел на интегралния коефициент на функционална надеждност K_f позволява сравнение на различни конфигурации на системата за ИТО, като отчита диагностичната честота, техническото състояние, външните въздействия и логистичните ограничения и създава предпоставки за практическо приложение както в национален, така и в съюзен контекст.

4. Примерните числови разчети и сравнителният анализ доказват, че внедряването на подвижни средства за техническо обслужване и ремонт води до съществено повишаване на интегралния коефициент K_f , като националната ПСТОР платформа осигурява приблизително 50% увеличение спрямо система без ПСТОР, а съюзната платформа от клас FRSN – около 75%, което потвърждава, че ПСТОР надграждат традиционната система за ИТО, повишават оперативната устойчивост и намаляват логистичните зависимости.

ОБЩИ ИЗВОДИ

1. Инженерно-техническото осигуряване при аварийно-спасителни дейности представлява ключов фактор за поддържане на оперативната готовност и функционалната надеждност на инженерната техника в условия на висока динамика, неопределеност и ограничени ресурси, като традиционните подходи към инженерната поддръжка не осигуряват необходимата устойчивост при бързо изменяща се оперативна среда.

2. Работоспособността и надеждността на инженерната техника се формират под въздействието на комплекс от технически, организационни, логистични, външносредови и рискови фактори, поради което надеждността следва да се разглежда като интегрална характеристика на цялата система за инженерно-техническо осигуряване, а не само като функция на механичното състояние на машините.

3. Разработеният функционален модел на инженерно-техническото осигуряване, основан на интегралния коефициент на функционална надеждност K_f и частния коефициент за оперативна ефективност на подвижните средства за техническо обслужване и ремонт K_{on} , осигурява методологичен синхрон между локално-оперативния и системния подход за количествена оценка на готовността и ефективността на инженерните формирования.

4. Прилагането на предложените модели към различни конфигурации на инженерно-техническо осигуряване доказва, че внедряването на подвижни средства за техническо обслужване и ремонт води до съществено повишаване на функционалната надеждност на инженерната техника, изразено в съкращаване на времето за възстановяване, намаляване на логистичните зависимости, повишаване на ремонтопригодността и увеличаване на оперативната устойчивост, дори при базови конфигурации на ПСТОР.

5. Усъвършенстването на инженерно-техническото осигуряване изисква системен подход, съчетаващ целенасочена модернизация и оптимално конфигуриране на подвижните ремонтни средства с внедряване на унифицирани методики за оценка на

функционалната надеждност, като интегралният коефициент K_f осигурява устойчива основа за планиране, управление и повишаване на готовността, автономността и оперативната ефективност на инженерните формирования в краткосрочен и дългосрочен план.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящият дисертационен труд е насочен към усъвършенстване на системата за инженерно-техническо осигуряване при аварийно-спасителни дейности чрез използване на подвижни средства за техническо обслужване и ремонт (ПСТОР). В рамките на проведеното изследване са анализирани теоретични постановки, изследвани са факторите, определящи работоспособността на инженерната техника, и е предложен нов подход за количествено оценяване на функционалната надеждност в динамична оперативна среда.

Обосновано развитието на инженерната спасителна техника и са изяснени теоретичните и организационни основи на инженерно-техническото осигуряване.

Извършен е комплексен анализ на вътрешните, външносредовите, рисковите и оперативните фактори, които влияят върху работоспособността на инженерната техника, както и на възможностите за тяхната оценка.

В дисертацията е разработена система от показатели за оценяване на работоспособността, формулиран е математически модел за интегралната функционална надеждност и е демонстрирана приложимостта му чрез сравнителни разчети за различни конфигурации на системата за ИТО.

Получените резултати показват, че включването на ПСТОР в системата за инженерно-техническо осигуряване значително подобрява оперативната готовност и автономност на инженерните формирования. Измереното повишаване на интегралната оценка на функционалната надеждност в сравнение с базов сценарий без ПСТОР доказва, че подвижните ремонтни средства не заместват, а надграждат традиционната структура за ИТО, като намаляват логистичните зависимости, съкращават времето за възстановяване на техника и повишават устойчивостта на инженерните екипи при аварийни и бедствени условия.

Разработеният модел е платформено независим и позволява неговото прилагане както към национални ПСТОР системи, така и към съюзни мобилни ремонтни платформи, което създава предпоставки за използването му в контекста на международна съвместимост и коалиционни операции в рамките на НАТО и ЕС. Това подчертава както научната стойност на разработката, така и потенциала ѝ за внедряване в практиката.

Въз основа на извършените изследвания и постигнатите резултати могат да се формулират следните основни заключения:

- Системата за инженерно-техническо осигуряване може да бъде усъвършенствана чрез внедряване на ПСТОР, които увеличават автономността, оперативната устойчивост и ремонтпригодността на инженерните формирования.

- Предложеният интегрален модел за оценяване на функционалната надеждност дава възможност за обективен сравнителен анализ на различни конфигурации на ИТО и подкрепя вземането на решения при планиране на инженерно-техническата поддръжка.

- Разработената система от показатели и методиката за тяхното нормализиране позволяват числово оценяване и прогнозиране на работоспособността на инженерната техника, независимо от типа на използваната ПСТОР платформа.

- Получените резултати потвърждават хипотезата на дисертационния труд относно ефекта на ПСТОР за усъвършенстване на системата за ИТО и показват значим практически ефект за инженерно-спасителните дейности.

В резултат трудът формира, както научна добавена стойност за теорията на инженерното-техническо осигуряване, така и приложна стойност за практиката на аварийно-спасителните формирания.

Разработените подходи, модели и оценки могат да послужат като направления за по-нататъшна работа:

- Провеждане на полеви изпитвания на различни ПСТОР конфигурации с цел определяне на реалните оперативни ограничения и възможности;

- Разработване на обучителни модули и тактически процедури за работа с ПСТОР в аварийно-спасителни операции;

- Изследване на взаимодействието между ПСТОР и други елементи на инженерно-техническото осигуряване, включително командни пунктове, логистични звена и системи за ранно предупреждение.

III. ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

НАУЧНИ ПРИНОСИ

1. Идентифицирани са параметрите с най-силно влияние върху ефективността на инженерно-техническото осигуряване (време за реагиране, ремонтпригодност, логистична автономност и ресурсна обезпеченост).

2. Установените зависимости, определящи инженерно-техническото осигуряване като интегрална система, подчинена на технически, логистични, външносредови и оперативни фактори са приложими във формирания за овладяване на последствията от бедствия и аварии.

3. Формулирана е последователна методическа рамка за внедряване на разработения модел в реални структури — идентификация на фактори → нормализация на показатели → изчисляване на $K_{оп}$ → изчисляване на K_f → интерпретация на резултатите за вземане на решения.

4. Предложената разработка може да бъде използвана за планиране, модернизация и избор на оптимални конфигурации на ПСТОР в инженерни формирания на Министерството на отбраната, МВР, ГДПБЗН и съвместно участващи сили в рамките на НАТО и ЕС.

5. Моделът създава предпоставки за интегриране в цифрови системи за мониторинг на техническа готовност и поддръжка на инженерната техника.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Разработен е авторски математически модел за оценяване на оперативната ефективност на подвижните средства за техническо обслужване и ремонт (ПСТОР), изразен чрез коефициента $K_{оп}$.

2. Разработен е авторски интегрален математически модел за оценка на функционалната надеждност на системата за инженерно-техническо осигуряване, реализиран чрез коефициента K_f .

3. Доказана е функционалната взаимовръзка между локалния показател $K_{оп}$ и интегралния показател K_f , което позволява да се проследи системният ефект на ПСТОР върху общата готовност на инженерната техника.

4. Моделите $K_{оп}$ и K_f са приложени експериментално за сравнение на различни конфигурации на инженерно-техническо осигуряване, като е установено, че включването на ПСТОР води до значимо повишаване на функционалната надеждност на инженерната техника.

5. Обосновани са интерпретационни прагови стойности и диапазони за оценка на ефективността на ПСТОР и на функционалната надеждност на инженерно-техническото осигуряване.

ПУБЛИКАЦИИ, СВЪРЗАНИ С ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД:

1. Атанасов И. „Полкова земекопна машина ПЗМ – 2М, наследникът на ПЗМ – 2“, Сборник доклади от годишна университетска научна конференция - 2024, Том 4, Научно направление „Технически науки“ стр. 35-39, Издателски комплекс на НБУ „Васил Левски“ ВТ, 2024, ISSN 1314-1937

2. Атанасов И. „Бронирана ремонтно – евакуационна машина LYNX CSV“, Сборник доклади от годишна университетска научна конференция - 2024, Том 4, Научно направление „Технически науки“ стр. 41-44, Издателски комплекс на НБУ „Васил Левски“ ВТ, 2024, ISSN 1314-1937

3. Стефанова В., Атанасов И. „Показатели за оценка на техническата ефективност на системата за инженерно – техническо осигуряване при аварийно спасителни работи“, Сборник доклади от научна конференция „Близкия космос – обща цел“ - 2025, Том 1, Научно направление „Технически науки“ стр. 264-268, Издателски комплекс на НБУ „Васил Левски“, ISSN 2815-3510

4. Терзиев Й., Атанасов И. „Превенция от наводнения“, Сборник доклади от научна конференция „Близкия космос – обща цел“ - 2025, Том 1, Научно направление „Технически науки“ стр. 269-275, Издателски комплекс на НВУ „Васил Левски“, ISSN 2815-3510

NATIONAL MILITARY UNIVERSITY “VASIL LEVSKI”



FACULTY OF SECURITY AND DEFENCE

DEPARTMENT OF ENGINEERING SUPPORT

captain Ivan Atanasov Atanasov

**IMPROVEMENT OF THE ENGINEERING AND TECHNICAL
SUPPORT SYSTEM IN EMERGENCY AND RESCUE OPERATIONS**

ABSTRACT

**of a dissertation for the award of the educational and scientific degree
“DOCTOR”**

Field of Higher Education: 5. „Technical Sciences“

Professional Field: 5.13. „General Engineering”

Doctoral Programme: „Construction, Road and Special-Purpose Machinery”

Veliko Tarnovo

2026

NATIONAL MILITARY UNIVERSITY “VASIL LEVSKI”



FACULTY OF SECURITY AND DEFENCE

DEPARTMENT OF ENGINEERING SUPPORT

captain Ivan Atanasov Atanasov

**IMPROVEMENT OF THE ENGINEERING AND TECHNICAL
SUPPORT SYSTEM IN EMERGENCY AND RESCUE OPERATIONS**

ABSTRACT

**of a dissertation for the award of the educational and scientific degree
“DOCTOR”**

Field of Higher Education: 5. „Technical Sciences“

Professional Field: 5.13. „General Engineering”

Doctoral Programme: „Construction, Road and Special-Purpose Machinery”

SCIENTIFIC SUPERVISOR

Colonel Assoc. Prof. Dr Eng. Ivan Georgiev Ivanov

Veliko Tarnovo

2026

The dissertation was reviewed and scheduled for public defence on 09 March 2026 at a meeting of the Departmental Council of the Department of Engineering Support, Faculty of Security and Defence, at the National Military University “Vasil Levski”, under the Doctoral Programme “Construction, Road and Special-Purpose Machinery”.

The dissertation comprises 120 pages.

Appendices: 5, totalling 10 pages.

Figures: 6.

Tables: 9.

Number of references: 72.

Publications: 4.

The public defence of the dissertation will take place on 09 March 2026 at 11:00 a.m. in Room No. 2303, third floor, second academic building of the Faculty of Security and Defence, National Military University “Vasil Levski”, Veliko Tarnovo.

The materials related to the defence are available for consultation at the Institute for Research and Innovation Activities of the National Military University “Vasil Levski”.

The author of the dissertation is a doctoral candidate in independent mode of study at the Department of Engineering Support, Faculty of Security and Defence, National Military University “Vasil Levski”.

The doctoral candidate is employed as an Assistant Lecturer at the Department of Engineering Support, National Military University “Vasil Levski”.

Author: Captain Ivan Atanasov Atanasov

Title: “Enhancement of the Engineering and Technical Support System for Emergency and Rescue Operations”

Print run: ____ copies

Printed on: ____ . ____ 2026

Publishing House of the National Military University “Vasil Levski”, Veliko Tarnovo

I. GENERAL CHARACTERISTICS OF THE DISSERTATION

RELEVANCE OF THE PROBLEM

The relevance of this dissertation arises from the increasing frequency and scale of natural disasters and technological accidents, accompanied by significant human casualties and material damage, which necessitate the continuous improvement of crisis management and civil protection systems. Under these conditions, emergency and rescue activities are characterised by high dynamics, short response times, and the requirement for reliable operation of engineering equipment in extreme environments.

Modern emergency and rescue operations require engineering machinery to maintain a high level of functional readiness in the presence of damaged infrastructure, adverse climatic conditions, limited logistical resources, and increased operational risk. Practice demonstrates that failures of engineering equipment during emergency and rescue activities lead to serious delays, compromise operational effectiveness, and increase risks to rescue teams and the affected population.

In this context, engineering and technical support is established as a key element of the disaster response system. It is not limited solely to the performance of repair activities, but rather constitutes an integrated process encompassing diagnostics, technical maintenance, resource management, mobile logistics, and risk assessment throughout the entire life cycle of engineering equipment.

The dynamic development of engineering machinery—from massive mechanical structures to mobile, digitalised, and modular systems—changes the requirements for their maintenance and recovery. The contemporary engineering approach places emphasis not so much on the structural robustness of equipment, but on the capability for rapid restoration of operational functionality under field conditions. This necessitates the development and application of new models for assessing functional reliability and the effectiveness of engineering and technical support.

The aim of the dissertation is to examine existing methods for assessing the effectiveness of engineering machinery in emergency and rescue operations through the development of structural models and the determination of coefficients that enhance the efficiency of the overall system.

Main Objectives:

- to investigate and analyse the impact of mobile repair assets on the effectiveness of the engineering and technical support system;
- to investigate and analyse the influence of technical maintenance and diagnostics on the operational effectiveness of equipment used in emergency and rescue activities;
- to propose methodologies for improving the system of engineering machinery through the utilisation of mobile repair assets.

The object of the study in this dissertation comprises the representatives of mobile repair assets.

The subject of the study includes the influencing characteristics and key indicators for improving the system of engineering and technical support in emergency and rescue activities.

The achievement of the research objectives and the solution of the stated tasks are accomplished through the application of **methods** of system and structural-functional analysis, structural and mathematical modelling, methods of mathematical statistics and data normalisation, and multi-criteria and integral evaluation methods.

For greater specificity and significance of the research, the study is conducted under the following defined *limitations*:

- Only the various types of mobile repair assets for engineering machinery and their impact on the system of engineering machinery are considered.

II. STRUCTURE OF THE DISSERTATION

Structure of the Dissertation

The development of the dissertation is directed towards the fulfilment of the stated research objective and the research tasks derived therefrom. The analysis is focused on the object and subject of the study in accordance with the formulated research thesis and the defined limitations. In this regard, the dissertation comprises an introduction, three chapters with corresponding conclusions, general conclusions, a conclusion, scientific contributions, scientific and applied contributions, a glossary of abbreviations used, a list of references, and a list of appendices.

CHAPTER ONE

FORMULATION OF THE RESEARCH PROBLEM

1.1. Historical Development of Engineering Machinery and Rescue Equipment

The analysis of the development of engineering machinery and rescue equipment reveals a consistent trend from solutions based primarily on manual labour and limited mechanisation towards complex engineering systems characterised by a high degree of mobility, autonomy, and functional reliability. In the early stages, the effectiveness of emergency and rescue activities was highly dependent on the human factor, while the capabilities for maintaining and restoring equipment within the disaster area were limited.

The development of heavy engineering mechanisation after the Second World War led to a significant increase in productivity and the scale of operations; however, it also revealed limitations associated with low autonomy and dependence on stationary repair facilities. This determined the need for a new approach, in which reliability is achieved not solely through structural robustness, but through the capability for rapid technical recovery.

At the contemporary stage, the development of engineering equipment is directed towards the integration of digital technologies, modular design solutions, and real-time diagnostic systems. This transition underlies the increasing role of mobile maintenance and repair assets, which become a key element in maintaining the functional readiness of engineering machinery during emergency and rescue activities. Thus, historical development logically leads to the necessity for the enhancement of the system of engineering and technical support as an integrated and adaptive process.

1.2. Analysis of Hazards and Disasters Affecting Engineering Machinery in Emergency and Rescue Activities

The analysis of hazards and disasters affecting engineering machinery in emergency and rescue activities indicates that the effectiveness of the employed equipment is directly dependent on the nature, intensity, and spatio-temporal parameters of crisis events. Engineering equipment operates under conditions of damaged infrastructure, unstable terrain,

adverse climatic influences, and increased operational risk, which creates prerequisites for accelerated wear, functional failures, and reduced reliability.

Depending on their origin, hazards and disasters may be classified as natural, anthropogenic, and combined. Natural disasters include floods, earthquakes, landslides, fires, snowstorms, and extreme meteorological phenomena, which exert a direct impact on the mobility, stability, and operational capability of engineering machinery. Anthropogenic hazards are associated with industrial accidents, transport incidents, contamination, and the presence of hazardous materials, where the risk is often compounded by the combined effects of technological and natural factors.

Of particular importance for assessing the impact on engineering equipment are the frequency and distribution of disasters at the national level. Statistical data for the Republic of Bulgaria indicate a high intensity of crisis events of various types, which determines the necessity for engineering machinery with a high level of functional readiness and the capability for prolonged operation in an autonomous mode.

Table 1. Number of Disasters by Type for the Period 2013–2023

№	Type of Crisis Event	Number
1.	Fires	17 252
2.	Landslides	643
3.	Earthquakes	51
4.	Droughts	96
5.	Floods	3 533
6.	Storms, Tornadoes, Whirlwinds, and Waterspouts	806
7.	Hailstorms	115
8.	Snowstorms (Snowdrifts)	589
9.	Icing and Frost Conditions	445
10.	Accidents	962
11.	Vehicle Accidents	18 810
12.	Pollution (Chemical Substances, Hazardous Waste, Municipal Waste, and Others)	138
13.	Other Crisis Disasters and Events	82
TOTAL Number of Disasters		43 522

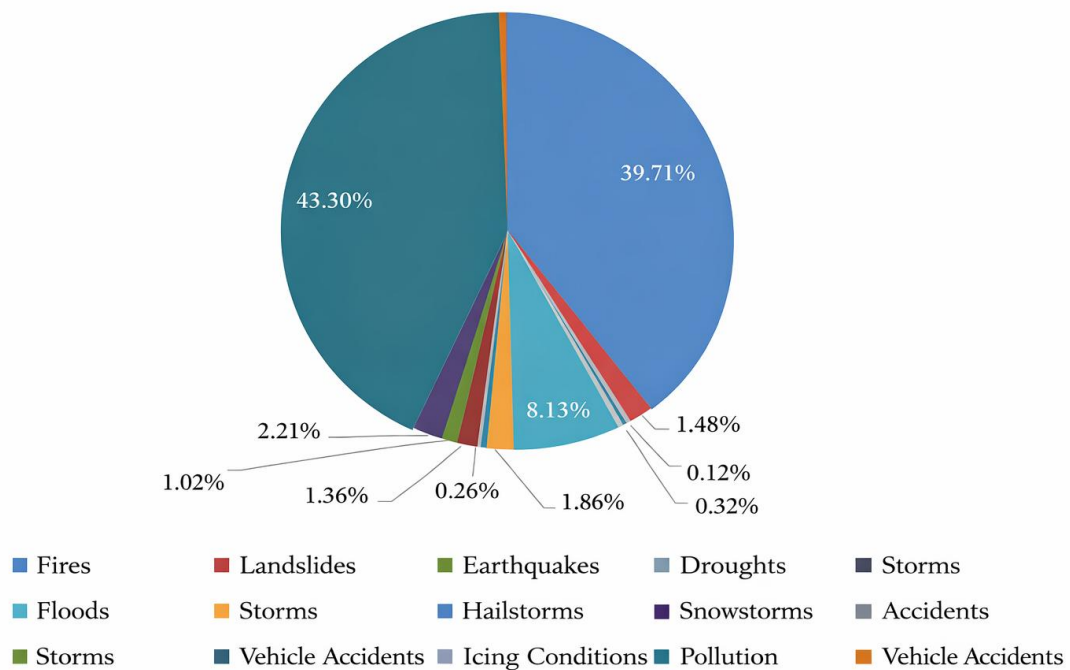


Figure 1. Distribution of Crisis Events by Type for the Period 2013–2023 (Percentage Share)

The analysis of the data indicates the dominance of fires, floods, and transport incidents, which imposes increased requirements on engineering equipment in terms of mobility, resistance to thermal and hydrological impacts, and the capability for rapid recovery following partial failures. Under these conditions, failures of individual assemblies or systems may lead to significant delays in emergency and rescue operations and to an increased risk to personnel.

An important element of the analysis is the identification of critical factors that affect the operational capability of engineering machinery in a disaster environment. These include mechanical loads, the impact of water, dust, and aggressive substances, temperature fluctuations, as well as limitations in logistical and repair support. The interaction among these factors necessitates the application of a systemic risk assessment approach that considers not only the probability of failure occurrence, but also its consequences for the overall execution of emergency and rescue activities.

The conducted analysis substantiates the necessity for integrating methods of functional safety, diagnostics, and risk management into the system of engineering and technical support. This creates the prerequisites for the timely identification of vulnerabilities, the reduction of the likelihood of critical failures, and the enhancement of the resilience of engineering equipment in emergency and rescue operations.

1.3. Main Tasks and Principles of Engineering and Technical Support in Emergency and Rescue Activities

Engineering and technical support in emergency and rescue activities constitutes an organised system of measures aimed at maintaining and restoring the operational capability of engineering equipment employed in actions under conditions of disasters, accidents, and

catastrophes. Its role is directly related to ensuring the operational readiness, safety, and continuity of engineering units in a dynamic and high-risk environment.

The main tasks of engineering and technical support derive from the necessity for timely response and the efficient utilisation of engineering equipment under conditions of limited resources and a high degree of uncertainty. These tasks include the diagnostics and assessment of the technical condition of machinery, the organisation and execution of routine and emergency repairs, the technical evacuation of damaged equipment, as well as the provision and management of spare parts, tools, and consumables. A significant role is also played by the provision of energy, water supply, and communication resources required for autonomous operation within the disaster area.

The effective performance of these tasks is based on the application of specific principles that determine the organisation and functioning of engineering and technical support. A leading principle is the maintenance of a high level of technical readiness of engineering equipment, which requires continuous condition monitoring and the timely performance of technical maintenance and repair. Another fundamental principle is the minimisation of the time required to restore operational capability, as delays in repair activities may result in substantial operational losses during emergency and rescue operations.

Under disaster conditions, the principle of autonomy assumes particular importance, implying the capability to perform technical maintenance and repair in field conditions without dependence on stationary infrastructure. This necessitates the use of mobile maintenance and repair assets capable of providing diagnostics, repair, and supply in close proximity to the area of operations. A complementary principle is the integration between engineering and technical support and logistical processes, which enables optimal resource management and coordination among the various elements of the system.

The analysis of the tasks and principles of engineering and technical support demonstrates that its effectiveness is not determined solely by the availability of technical assets, but by the degree of their organisation, adaptability, and alignment with the operational requirements of emergency and rescue activities. This substantiates the need for the enhancement of the system of engineering and technical support through the application of a systemic approach based on risk assessment, functional reliability, and the optimisation of repair and recovery processes.

1.4. Structure, Assets, and Organisation of Engineering and Technical Support in Emergency and Rescue Activities

The structure and organisation of engineering and technical support in emergency and rescue activities are determined by the need to ensure the continuous technical readiness of engineering equipment under conditions of a dynamic operational environment, damaged infrastructure, and limited resources. The system of engineering and technical support comprises a set of organisational, technical, and logistical elements functioning in close interrelation with the aim of maintaining and restoring the operational capability of the machinery and assets employed.

From a structural perspective, engineering and technical support includes various levels and units that provide technical diagnostics, maintenance, repair, and the supply of material resources. Depending on the scale and nature of emergency and rescue activities, these functions may be performed by stationary and mobile repair formations; however, under disaster conditions, mobile maintenance and repair assets assume a leading role. They enable diagnostic and repair activities to be carried out in close proximity to the area of operations, which significantly reduces the time required to restore operational capability.

The assets for engineering and technical support include mobile repair workshops, diagnostic equipment, tools, spare parts, energy and lighting resources, as well as transport means for technical evacuation. Their configuration and level of equipment are determined by the type of engineering machinery employed, the expected loads, and the specific characteristics of the operational environment. The effective utilisation of these assets requires prior planning, standardisation of equipment, and a clear allocation of functions among the individual units.

Table 2. Phased Approach to the Organisation of Engineering and Technical Support

Phase	Activity
Preparation	Risk analysis, allocation of forces and assets, planning of routes and resources
Deployment	Establishment of support bases, positioning of repair teams, provision of communications
Execution	Continuous technical support, restoration of damaged systems and equipment
Completion	Technical inspection, reporting, and analysis of utilised resources and effectiveness

The organisation of engineering and technical support in emergency and rescue activities is based on a phased approach encompassing the stages of preparation, deployment, operation, and recovery. Within this approach, continuity and coordination of technical activities are ensured while accounting for the dynamic changes in the situation and the priorities of rescue operations. Of particular importance is the flexibility of the organisation, which enables the adaptation of repair and recovery processes to specific conditions and emerging technical problems.

The analysis of the structure, assets, and organisation of engineering and technical support demonstrates that its effectiveness depends not only on the availability of technical resources, but also on the degree of their integration, mobility, and alignment with operational tasks. This necessitates the enhancement of organisational models and the application of a systemic approach to the planning and management of engineering and technical support in emergency and rescue activities.

CONCLUSIONS FROM CHAPTER ONE

1. The analysed sources provide limited information on the use of mobile repair assets in the mitigation of the consequences of disasters, accidents, and catastrophes.
2. The method for assessing the impact of technical maintenance regimes on the effectiveness of the utilisation of engineering equipment has been insufficiently addressed.
3. No criteria or criterion-based models have been developed for determining engineering and technical effectiveness and for defining the parameters of the system of engineering and technical support in emergency and rescue activities.

CHAPTER TWO

FACTORS INFLUENCING THE OPERATIONAL CAPABILITY AND FUNCTIONAL SAFETY OF MOBILE MAINTENANCE AND REPAIR ASSETS IN EMERGENCY AND RESCUE ACTIVITIES

2.1. Classification and Functional Role of Mobile Maintenance and Repair Assets in Emergency and Rescue Activities

Mobile maintenance and repair assets occupy a key position within the system of engineering and technical support in emergency and rescue activities, as they provide the capability to maintain and restore the operational capability of engineering equipment under conditions of damaged infrastructure and limited access to stationary repair facilities. Their functional role is directly associated with reducing recovery time, increasing autonomy, and maintaining a high level of operational readiness of engineering units.

Depending on their purpose, level of equipment, and scope of activities, mobile maintenance and repair assets may be classified according to several main criteria. One of the principal criteria is their functional designation, under which assets are distinguished as those intended for technical diagnostics, routine repair, recovery repair, and comprehensive maintenance. This classification enables the optimal allocation of resources in accordance with the nature of the failures encountered and the operational requirements of emergency and rescue activities.

Another significant classification criterion is the degree of mobility and autonomy of the mobile assets. In this respect, assets are differentiated into those constructed on vehicle chassis, trailers, or modular platforms, which can be rapidly deployed within the disaster area and operate for extended periods without external supply. The autonomy of these assets is determined by the availability of energy sources, spare parts, tools, and diagnostic equipment required to perform repair activities under field conditions.

Table 3. Classification of Mobile Maintenance and Repair Assets

Classification Criterion	Classification Categories / Types	Characteristics
By purpose	General-purpose	Universal for a wide range of repair activities
By purpose	Specialised	Optimised for specific equipment (fire engines, hydraulic systems, SCBA, generators, etc.)
By structural platform (chassis)	Trucks; vans; container-based / modular platforms	Differentiated by mobility, equipment capacity, and autonomy; container-based platforms provide the greatest flexibility
By functional specialisation of repair	Mechanical; electrical; hydraulic; welding; combined	Equipped according to the most frequent equipment failures; combined platforms enable the performance of multiple types of repair activities

Classification Criterion	Classification Categories / Types	Characteristics
By degree of autonomy	Limited autonomy	Dependent on external resources

The functional role of mobile maintenance and repair assets is expressed not only in the performance of specific repair operations, but also in the provision of technical diagnostics, preventive maintenance, and logistical support for engineering equipment. Through the timely detection and elimination of partial failures, the escalation of malfunctions is prevented and the risk of complete loss of operational capability during critical phases of emergency and rescue operations is reduced.

The analysis of the classification and functional role of mobile maintenance and repair assets indicates that their effectiveness depends on the degree of alignment between the capabilities of the assets and the actual needs of engineering equipment within a specific operational environment. This necessitates the assessment of internal and external factors influencing their operational capability and functional safety.

2.2. Internal Factors Determining the Operational Capability of Engineering Machinery

The operational capability of engineering machinery in emergency and rescue activities is to a significant extent determined by the set of internal technical factors embedded in their design, operational characteristics, and level of technical condition. These factors exert a direct influence on the reliability, safety, and ability of the machinery to perform assigned tasks under conditions of increased loads and limited resources.

The principal internal factors include the structural features of the machinery, including the strength and stability of load-bearing elements, the quality and reliability of power units, transmissions, and working mechanisms, as well as the degree of modularity and maintainability. Design solutions that facilitate access to assemblies and components and allow for rapid replacement or repair are of critical importance for maintaining operational capability under field conditions.

A significant internal factor is the technical condition of the machinery, which is determined by the degree of wear of major components, the presence of latent defects, and the condition of control and safety systems. Insufficient or untimely technical diagnostics may lead to failures at critical moments, thereby compromising the execution of emergency and rescue operations.

A substantial role is also played by internal operational parameters related to operating regimes, loads, and the interaction among the individual systems of the machinery. Under emergency and rescue conditions, engineering machinery often operates outside its nominal regimes, which accelerates wear and increases the likelihood of functional failures. This imposes increased requirements on monitoring, diagnostic, and technical condition management systems.

The analysis of internal factors indicates that the operational capability of engineering machinery is not a static quantity, but a dynamic indicator that varies depending on the technical condition, operating regimes, and the effectiveness of maintenance. This substantiates the need for the application of a systemic approach to technical diagnostics and technical condition management in order to ensure the timely detection of degradation processes and the prevention of critical failures.

2.3. External Factors and Threats under Conditions of Natural Disasters and Anthropogenic Incidents

External factors and threats exert a significant influence on the operational capability and functional safety of engineering machinery in emergency and rescue activities. In contrast to internal factors, which are associated with the design and technical condition of the machinery, external factors are determined by the characteristics of the environment in which rescue operations are conducted and are often variable and difficult to predict.

The principal external factors include climatic and meteorological conditions, including extreme temperatures, precipitation, wind, snowfall, and icing, which affect mobility, traction, cooling, and the operation of power and hydraulic systems. Under conditions of floods, fires, and landslides, engineering machinery is exposed to water, mud, dust, aggressive chemical substances, and high temperatures, which increases the risk of accelerated wear and sudden failures.

A significant external factor is the condition of infrastructure within the disaster area. Damaged roads, bridges, and communication networks restrict the access of engineering machinery and impede the performance of technical maintenance and repair. This necessitates the use of machinery with enhanced mobility and autonomy, as well as mobile maintenance and repair assets capable of operating in the absence of stationary infrastructure.

Anthropogenic incidents, such as industrial accidents, transport catastrophes, and contamination with hazardous substances, create additional risks for engineering machinery and service personnel. The presence of toxic, explosive, or radioactive substances requires the use of specialised protective equipment and limits the time available for work within the incident area, which directly affects the organisation of engineering and technical support.

The analysis of external factors and threats demonstrates that their impact on engineering machinery is complex and often combined, which complicates the application of standard approaches to maintenance and repair. This substantiates the need for the integration of risk assessment and functional safety methods that account for environmental influences and support decision-making for maintaining the operational capability of equipment in emergency and rescue activities.

2.4. Methodologies for Technical Diagnostics and Risk Assessment of Engineering Machinery

Technical diagnostics and risk assessment constitute core elements of the system of engineering and technical support in emergency and rescue activities, as they enable the timely identification of deviations in the technical condition of engineering machinery and the prevention of functional failures during critical phases of operations. Under conditions of increased dynamics and limited time, diagnostic processes should be directed towards the rapid and reliable determination of the operational capability and residual life of major assemblies and components.

Methodologies for technical diagnostics include visual, instrumental, and functional methods through which the condition of structural elements, power, hydraulic, and electronic systems of engineering machinery is assessed. Visual diagnostics allow the rapid detection of visible damage, leaks, and deformations, while instrumental methods provide a more accurate evaluation of parameters such as pressure, temperature, vibrations, and electrical characteristics. Functional testing complements the diagnostic process by verifying system performance under real or near-real operating conditions.

Risk assessment in the operation of engineering machinery is based on the analysis of the probability of failure occurrence and the severity of its consequences for emergency and rescue activities. In this context, methods are applied to identify critical components and processes, as well as to classify risks according to their significance. The integration of technical diagnostic results into the risk assessment process enables informed decision-making regarding the necessity for repair, replacement, or the temporary withdrawal of individual machines from operation.

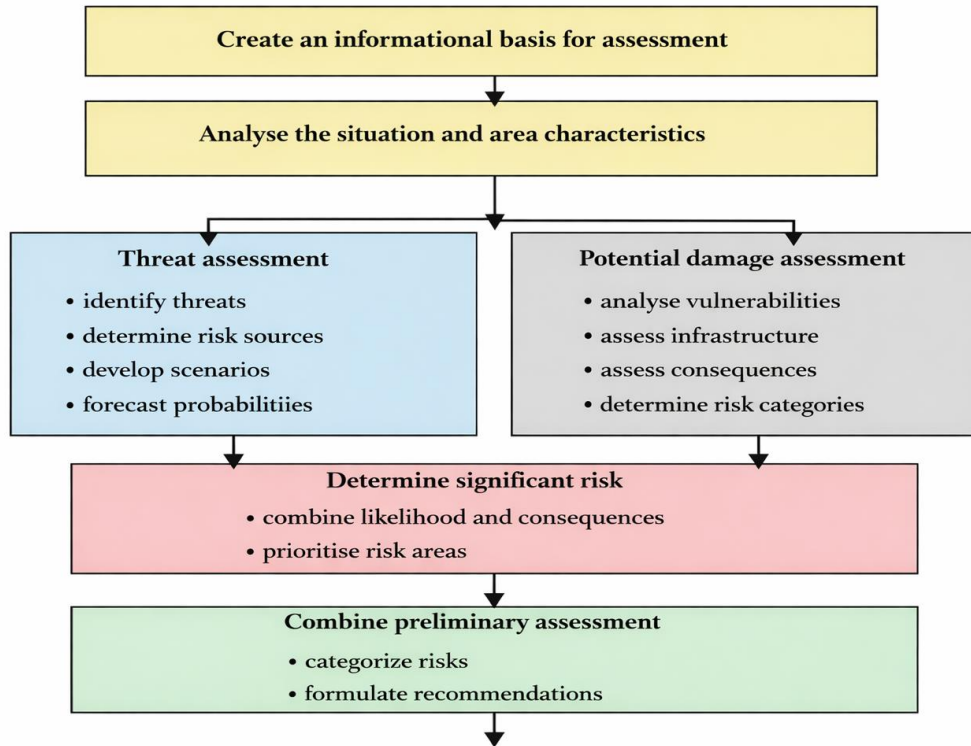


Figure 3. Structured Process for the Assessment of Hazards, Vulnerabilities, and Combined Risk

The analysis of methodologies for technical diagnostics and risk assessment indicates that their effectiveness depends on the degree of integration within the overall system of engineering and technical support. The application of a systemic approach that integrates diagnostic results, risk assessment, and the planning of repair and recovery activities creates the prerequisites for enhancing the functional reliability and safety of engineering machinery in emergency and rescue activities.

2.5. Integrated Model of Influencing Factors on Functional Reliability

The integrated assessment of factors influencing the functional reliability of engineering equipment in emergency and rescue activities requires a systematic consideration of the internal parameters of the machinery, the external operational environment, and the risk impacts that act simultaneously and in dynamic interrelation. Practice demonstrates that failures are rarely the result of a single factor, but rather arise from the combined and synergistic effects of design-related, operational, and environmental influences.

The functional reliability of engineering equipment under disaster conditions should be regarded as a dynamic balance between the capacity of the machinery to withstand loads and the rate of degradation of its systems under the influence of the external environment. In this sense, reliability assessment cannot be static or based solely on nominal service life, but should take into account the current technical condition, operating conditions, and the effectiveness of technical maintenance.

The analysis of the preceding subsections indicates that the impact on the operational capability of engineering equipment is realised through three main groups of factors: internal factors reflecting the structural and technical condition and residual life; external factors determined by the characteristics of the operational environment and disaster impacts; and risk factors associated with the probability and criticality of failures in individual assemblies and components. The key practical challenge is not the presence of an individual factor, but the simultaneous and combined influence of these factors within a specific operational context.

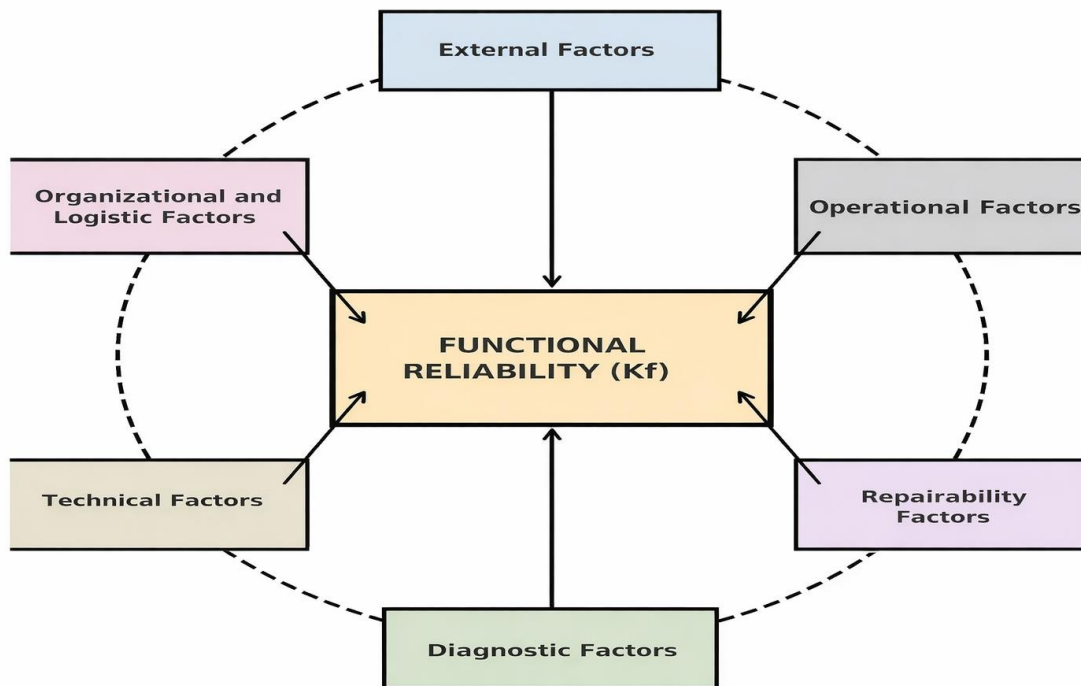


Figure 4. Radial Model of the Main Factors Influencing Functional Reliability

In this regard, the use of an integral coefficient of functional reliability, denoted as K_f , is proposed, which consolidates internal, external, and risk-related influences, weighted according to their operational significance and normalised with respect to the diagnostic time interval. The formal representation of the model is as follows:

$$K_f = \frac{(K_i \times w_i) + (K_e \times w_e) + (K_r \times w_r)}{T_d} \quad (2.1)$$

Where:

K_f – integral coefficient of functional reliability;

K_i – coefficient of internal factors (structural and technical condition);
 K_e – coefficient of external factors (operational environment and impacts);
 K_r – coefficient of risk factors (diagnostically determined probability of failure);
 w_i, w_e, w_r – weighting coefficients assessing the relative significance of each group of factors for the specific mission;
 T_d – diagnostic time interval defining the frequency of monitoring and updating of machinery condition data.

The integral coefficient of functional reliability K_f , enables not only the quantitative assessment of the current level of functional reliability, but also the forecasting of changes in operational capability over time, which makes it an applicable tool for operational planning, the prioritisation of technical maintenance, and the optimisation of the utilisation of mobile maintenance and repair assets.

CONCLUSIONS FROM CHAPTER TWO

1. The operational capability and functional reliability of engineering equipment are formed under conditions of high dynamics and uncertainty, in which the impacts on machinery are realised simultaneously through internal technical parameters, external physico-chemical factors, and risk influences determined by diagnostic methods.

2. The isolated assessment of the technical condition of assemblies and components is insufficient for the reliable forecasting of failures, as the external operational environment and probabilistic risk indicators exert a significant influence on the service life and resilience of engineering equipment.

3. Functional reliability should be regarded as an integral parameter that consolidates technical, environmental, and risk-related influences and accounts for their simultaneous manifestation and temporal dynamics, which renders static assessments of technical serviceability inapplicable under real emergency and rescue conditions.

4. The necessity of an integrated analytical approach to the assessment of functional reliability is substantiated, enabling the quantitative representation of condition, the tracking of its dynamics, and the establishment of a methodological basis for modelling, failure forecasting, and the optimisation of maintenance and resource support, as developed in Chapter Three.

CHAPTER THREE

MODELLING AND OPTIMISATION OF ENGINEERING AND TECHNICAL SUPPORT PROCESSES IN EMERGENCY AND RESCUE ACTIVITIES

3.1. ANALYSIS OF PROBLEM AREAS IN THE OPERATION OF ENGINEERING EQUIPMENT

The operation of engineering equipment in emergency and rescue activities is conducted under conditions that differ substantially from standard operating regimes, which leads to increased and difficult-to-predict loads on assemblies, equipment, and service

personnel. The combined impact of mechanical, thermal, and chemical factors accelerates degradation processes and increases the risk of functional failures, even in machinery with nominal technical serviceability.

The analysis of operational deviations indicates that the decline in operational capability is rarely the result of a single factor, but rather arises from the cumulative effect of internal technical constraints, external environmental influences, and insufficient adaptation of organisational and logistical processes to the conditions of the specific mission. In this sense, engineering equipment should be regarded as part of an interconnected engineering and technical system, in which the effectiveness of an individual element depends on its technical condition, management, maintenance, logistical support, and the temporal constraints of the operation.

Problem areas in the operation of engineering equipment may be systematised according to the factor–deviation–consequence mechanism and, from an operational perspective, are manifested through three main groups of deviations:

- technical-resource-related, associated with accelerated wear and unstable operating regimes;
- environmental, обусловени by aggressive physico-chemical and meteorological influences;
- operational, arising from constraints in time, logistics, and crew workload.

These groups of deviations do not act in isolation, but rather form an interconnected system of causes and consequences, in which the impact on one element leads to a cascading deterioration of overall operational capability. This necessitates the structured identification of problem areas and their quantitative assessment as part of the overall system of engineering and technical support.

Table 5. Problem Areas, Consequences, and Measurement Indicators

Problem Area	Operational Consequence	Measurement Indicator
Accelerated wear of assemblies and components	Reduced power output and productivity	Resource degradation rate; hours to critical threshold
Thermal / vibrational overload	Unstable operation under load	Temperature and vibration amplitudes; deviation from nominal parameters
Inefficient hydraulic or power system	Loss of controllability and functional modes	Pressure drop; voltage instability; fuel consumption
Aggressive environment (chemical / biological / radiological)	Increased risk to the crew and reduced duration of operation	Contamination levels; safe operating time without protection
Unfavourable terrain and obstacles	Limited manoeuvrability and accessibility	Travel speed; percentage of impassable sections
Limited logistical support	Delays in the work cycle and repair activities	Time for delivery of spare parts; service time
Insufficient diagnostic capability	Gaps in failure forecasting	Diagnostic interval; accuracy of diagnostic signals
High crew workload	Increased likelihood of errors and incidents	Shift duration; fatigue coefficient; number of operator errors

The analysis indicates that a substantial proportion of the negative consequences are associated not with the primary occurrence of failures, but with the limited capability for their timely diagnostics, maintenance, and rectification within the area of emergency and rescue operations. This places the maintenance, repair, and recovery of engineering equipment at the centre of engineering and technical support.

In this regard, the need for a quantitatively measurable system of indicators for assessing the operational capability of engineering equipment is substantiated.

The existing system of indicators C1–C25 does not fully reflect the specific characteristics of mobile maintenance and repair assets operating under conditions of limited time, the absence of stationary infrastructure, and increased risk.

Therefore, the introduction of Subsystem C26 “Mobile Maintenance and Repair Assets” is proposed, which extends the existing system by emphasising operational readiness, repair and recovery potential, and autonomous operation of MMRA. Subsystem C26 comprises three functional domains: operational readiness (C261), repair and recovery activities (C262), and autonomous operation (C263), which provide a targeted and applicable assessment under emergency and rescue conditions.

3.2. Development of a System of Indicators for Assessing Operational Capability

The effectiveness of engineering equipment in emergency and rescue activities requires that its technical condition and operational capability be assessed through a system of quantitative indicators that objectively reflect the influence of internal, external, risk-related, and operational factors. Under conditions of increased dynamics and uncertainty, technical diagnostics is established as the primary tool for obtaining reliable information on the condition of engineering machinery and for making timely decisions under constraints of limited time and resources.

The analysis of existing approaches indicates that classical indicators derived from reliability theory, based on statistical and probabilistic methods, are insufficient for assessing the operational capability of a specific machine under specific emergency and rescue scenarios. Consequently, the development of a system of indicators is required that accounts not only for technical serviceability, but also for environmental influences, failure risk, and operational constraints.

The developed system of indicators is constructed on the basis of the principles of informativeness, sensitivity, universality, adaptability, and quantifiability. The indicators are grouped into four main categories: indicators of the internal technical condition of engineering equipment, indicators of external environmental influences, indicators of risk factors, and operational indicators reflecting the logistical and temporal constraints of emergency and rescue operations.

Table 6. System of Indicators for Assessing Operational Capability

Category	Indicator	Description / Metric & Assessment	Value Type
Internal technical condition	P_1	Wear rate of assemblies and components	Normalised value (0–1)
	P_2	Stability of power and hydraulic operating regimes	Deviation from nominal parameters (%)
	P_3	Residual technical resource	Hours to critical threshold

External environmental influences	P_4	Aggressiveness of the operational environment (chemical / biological / radiological)	Classification index
	P_5	Terrain constraints and mobility	Share of impassable sections (%)
Risk-related actions	P_6	Probability of failure	Probabilistic assessment (0–1)
	P_7	Criticality of failure	Severity of consequences (coefficient)
Operational factors	P_8	Logistical and temporal delays	Service time relative to standard (%)
	P_9	Personnel workload	Fatigue index / shift duration

For the purpose of incorporating the developed indicators into the integral mathematical model, indicators P_1 to P_9 are normalised and integrated through the assignment of weighting coefficients $w_1 – w_9$ according to their significance for the specific operational mission, the introduction of a unified comparability scale, and the provision for dynamic updating under changing operating conditions. In this manner, the system of indicators provides the quantitative basis for mathematical modelling and for the aggregation of individual assessments into an integral parameter of functional reliability.

To enhance the objectivity of the assessment, a criterion-based evaluation of the effectiveness of mobile maintenance and repair assets has been developed, based on key operational and performance criteria such as mobility, autonomy, maintainability, environmental adaptability, and logistical independence. The systematisation and parameterisation of the indicators enable the formalisation of relationships among them and the construction of a mathematical model for the assessment and forecasting of the functional reliability of engineering equipment under dynamic conditions.

3.3. Formulation of Integral Coefficients for the Assessment of Engineering and Technical Support

In the course of the research, the need arises to introduce a quantitative indicator characterising the operational effectiveness of mobile maintenance and repair assets (MMRA) as an element of the system of engineering and technical support. The objective is to assess not only the availability of MMRA, but their actual contribution to enhancing the readiness and resilience of engineering equipment under emergency and rescue conditions.

Following an analysis of possible integral indicators incorporating multiple operational parameters, a simplified and practically applicable model is selected, structured around three key aspects: response time in the event of a failure, the effectiveness of repair activities, and operational autonomy.

Accordingly, an integral coefficient of operational effectiveness, denoted as K_{on} is formulated to consolidate these three dimensions into a single aggregated numerical assessment.

The integral coefficient of operational effectiveness of MMRA is introduced as follows:

$$K_{\text{on}} \in [0; 1], \quad (3.1)$$

Where:

- $K_{\text{on}} \rightarrow 1$ —indicates very high operational effectiveness of mobile maintenance and repair assets (MMRA);
- $K_{\text{on}} \rightarrow 0$ — indicates very low operational effectiveness.

It is proposed that K_{on} be defined as a weighted sum of three partial normalised coefficients:

$$K_{\text{on}} = w_t \cdot K_t + w_r \cdot K_r + w_a \cdot K_a, \quad (3.2)$$

Where:

- K_t — coefficient assessing response time;
- K_r — coefficient assessing the success and productivity of repair activities;
- K_a — coefficient assessing operational autonomy;
- w_t, w_r, w_a — weighting coefficients reflecting the relative importance of the three aspects.
- $w_t + w_r + w_a = 1, w_t, w_r, w_a \geq 0$.

In the general case, the weights may be adapted according to the specific scenario (e.g., under severely constrained logistics – a higher value of w_a , under a high dynamics of failures – a higher value of w_t).

In the baseline case, assuming equal significance of the three aspects, it may be adopted that:

$$w_t = w_r = w_a = \frac{1}{3} \quad (3.3)$$

i.e.:

$$K_{\text{on}} = \frac{K_t + K_r + K_a}{3} \quad (3.4)$$

In both cases, the underlying principle is the same:

K_{on} consolidates three normalised partial assessments into a single integral indicator.

Each of the partial coefficients is normalised within the interval $[0; 1]$, where:

- values close to 1 indicate a favourable condition with respect to the respective indicator;
- values close to 0 indicate an unfavourable condition.

Coefficient of Response Time K_t

Objective: to assess how rapidly mobile maintenance and repair assets (MMRA) respond to a repair request.

Let:

- T_{Φ} – actual average response time (from receipt of the task to the commencement of repair activities), [min];
- $T_{\text{доп}}$ – normative (allowable) response time, [min].

Then, the following is introduced:

$$K_t = 1 - \frac{T_{\Phi}}{T_{\text{доп}}}. \quad (3.5)$$

To avoid incorrect values, the following constraints are introduced:

- if $T_{\Phi} \geq T_{\text{доп}} \rightarrow K_t = 0$ the response is slower than allowable;
 - if $T_{\Phi} \ll T_{\text{доп}}$ and the formula yields a value greater than 1 $\rightarrow K_t$ is limited to 1,
- i.e., in practice the following is applied:

$$K_t = \min \{1, \max \left(0, 1 - \frac{T_{\Phi}}{T_{\text{доп}}} \right) \}. \quad (3.6)$$

In the text, a simplified notation K_t , may be used, while the formal constraints are specified in the accompanying description.

Coefficient of Repair Effectiveness K_r

Objective: to assess the proportion of repair tasks that are successfully completed on site, without the need for repeated intervention or evacuation to a stationary repair facility.

Let:

- $N_{\text{общ}}$ – total number of requests/failures for which mobile maintenance and repair assets (MMRA) are engaged during the period under consideration;
- $N_{\text{усп}}$ – number of successfully completed on-site repairs, in which the equipment is restored to an operational condition and can continue participation in emergency and rescue activities.

Then:

$$K_r = \frac{N_{\text{усп}}}{N_{\text{общ}}}. \quad (3.7)$$

Where:

- $K_r \rightarrow 1$ – almost all repairs are successfully performed in the field;
- $K_r \rightarrow 0$ – the predominant proportion of failures cannot be rectified by mobile maintenance and repair assets (MMRA).

If desired, at a later stage an additional multiplier accounting for repeated repairs may be incorporated; however, within the scope of the present study, this formulation is sufficient to provide a clear and intuitive quantitative assessment.

Coefficient of Autonomy K_a

Objective: to assess the extent to which mobile maintenance and repair assets (MMRA) can operate autonomously under field conditions, without additional resupply of fuel, spare parts, and consumables, and without returning to a base.

Let:

- T_{abt} – actual average duration of autonomous operation (hours or days), during which MMRA can perform tasks without additional resupply;
- $T_{цел}$ – normative or target duration of autonomous operation (optimisation objective).

Then:

$$K_a = \frac{T_{abt}}{T_{цел}}. \quad (3.8)$$

The following constraints are applied:

- if $T_{abt} \geq T_{цел} \rightarrow K_a = 1$;
- if $T_{abt} \ll T_{цел} \rightarrow K_a = 0$.
- The restriction to the interval $[0; 1]$ ensures the comparability of the three partial coefficients and facilitates their integration into $K_{оп}$.

Assuming equal weights (or scenario-dependent weights), interval-based evaluation zones for $K_{оп}$ may be defined as follows::

- $K_{оп} \in [0,70; 1,00]$ – **high operational effectiveness**;
- $K_{оп} \in [0,50; 0,69]$ – **satisfactory effectiveness**, optimisation of selected elements is recommended;
- $K_{оп} < 0,50$ – **insufficient effectiveness**, substantial modernisation and organisational and technical changes are required.

The integral coefficient $K_{оп}$ is defined as a weighted sum of three partial normalised coefficients:

$$K_{оп} = w_t \cdot K_t + w_r \cdot K_r + w_a \cdot K_a,$$

where K_t characterises response time, K_r – the effectiveness of repair activities and K_a – the autonomy of MMRA, while the weighting coefficients reflect their relative significance for the specific operational mission. Under conditions of equal significance of the aspects, an averaged form of the indicator is adopted.

The coefficient $K_{оп}$ is proposed as an authorial integral indicator that serves as an intermediate link between the specific operational characteristics of MMRA and the overall assessment of the functional reliability of engineering equipment.

On the basis of the system of indicators developed in Section 3.2, an integral mathematical model for the assessment of the functional reliability of engineering equipment is formulated. The indicators are normalised within the interval $[0; 1]$ and weighted according to their significance for the specific operational scenario. As an additional parameter, a

diagnostic coefficient is introduced, accounting for the influence of monitoring frequency on the probability of the timely detection of deviations.

The integral coefficient of functional reliability is defined as follows:

$$K_f = k_d \cdot \sum_{n=1}^N (P_n^* \cdot w_n),$$

Where:

- K_f — integral coefficient of functional reliability of engineering equipment;
- P_n^* — normalised assessment of the condition for indicator n (within the range 0–1);
- w_n — weighting coefficients reflecting the significance of the indicators ($\sum w_n = 1$);
- k_d —diagnostic coefficient accounting for the influence of monitoring frequency.
- The resulting value of K_f enables a rapid and objective assessment of the functional readiness of engineering equipment and the classification of its condition into zones of high, acceptable, reduced, or critical readiness.

Table 7. Assessment of Functional Readiness According to the Coefficient K_f

Range of K_f	Condition Assessment	Operational Interpretation
0,80 – 1,00	High functional readiness	The machinery is suitable for prolonged operation in a complex environment
0,60 – 0,79	Acceptable readiness	Permissible for operation under controlled conditions; enhanced monitoring is recommended
0,40 – 0,59	Reduced readiness	Limited operation is required; a maintenance and repair plan is necessary
< 0,40	Critical condition	Withdrawal from operation and immediate repair are recommended

3.4. Comparative Analysis of Results and Assessment of the Effectiveness of Engineering and Technical Support

The developed model provides flexibility in adapting to different types of engineering equipment and emergency and rescue scenarios through the modification of weighting coefficients and normalised assessments. At the same time, it retains operational applicability and can be implemented in tabular or software-based form, which makes it suitable for practical deployment within engineering and technical units.

The comparative analysis aims to assess the effectiveness of different configurations of the system of engineering and technical support in emergency and rescue activities through the application of the integral coefficient of functional reliability K_f . The analysis enables a quantitative comparison among three typical scenarios: an engineering and technical support

system without mobile maintenance and repair assets, a system with a national MMRA platform, and a system with an allied MMRA platform of the FRSN class.

Table 9. Comparison of the Values of the Integral Coefficient K_f

Scenario	Designation	K_f	Qualitative Operational Assessment	Difference Relative to the Baseline Scenario
ETS without MMRA	$K_f^{(0)}$	$\approx 0,39$	Stable operational capability under standard conditions; limited autonomy and adaptability in a dynamic environment	—
ETS with National MMRA Platform (MRS-ETS)	$K_f^{(BG)}$	$\approx 0,59$	Enhanced readiness; reduced dependence on logistical infrastructure; faster recovery of equipment under complex operational conditions	$\approx +50 \%$
ETS with Allied MMRA Platform (FRSN type)	$K_f^{(NATO)}$	$\approx 0,68$	High functional reliability; optimal maintainability and operational resilience under dynamic emergency scenarios	$\approx +75 \%$

The obtained values of the integral coefficient demonstrate a clearly expressed trend towards increased functional reliability with the implementation of mobile maintenance and repair assets (MMRA). In the baseline scenario without MMRA, a value of $K_f \approx 0,39$, is obtained, which corresponds to limited functional readiness under dynamic and complex conditions. The introduction of a national MMRA platform (MRS-ETS) increases the coefficient to $K_f \approx 0,59$, representing an improvement of approximately 50% relative to the baseline scenario. The highest value is recorded when using an allied MMRA platform of the FRSN class— $K_f \approx 0,68$, which corresponds to an increase in functional reliability of approximately 75%.

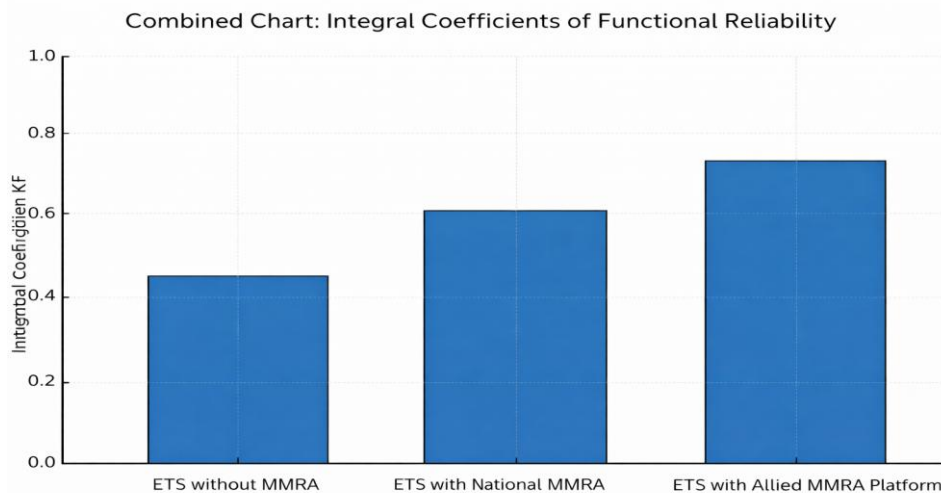


Figure 6. Combined Chart of Integral Coefficients of Functional Reliability

The results indicate that the implementation of mobile maintenance and repair assets (MMRA) significantly enhances the operational autonomy of the engineering and technical support system, shortens the recovery time of engineering equipment, and reduces dependence on stationary repair infrastructure. The observed differences in the values of the coefficient K_f represent an objective quantitative indication of the upgrading of the engineering and technical support system, rather than evidence of its initial inefficiency.

The developed integral model demonstrates applicability in both national and coalition contexts and enables an objective assessment of the impact of mobile maintenance and repair assets on the functional reliability of engineering equipment under emergency and rescue conditions.

CONCLUSIONS FROM CHAPTER THREE

1. The effectiveness of the system of engineering and technical support in emergency and rescue activities is determined by the combined influence of technical, external, risk-related, and operational factors, which necessitates the use of a comprehensive and integrated approach to assessing the operational capability of engineering equipment.

2. The developed system of indicators, together with the proposed procedure for their normalisation and aggregation, provides an objective and quantitatively substantiated assessment of the functional reliability of engineering equipment in a dynamic and variable operational environment.

3. The formulated mathematical model of the integral coefficient of functional reliability K_f enables the comparison of different configurations of the engineering and technical support system by accounting for diagnostic frequency, technical condition, external influences, and logistical constraints, and creates the basis for practical application in both national and allied contexts.

4. The illustrative numerical calculations and comparative analysis demonstrate that the implementation of mobile maintenance and repair assets leads to a substantial increase in the integral coefficient K_f , with the national MMRA platform providing an improvement of approximately 50% relative to a system without MMRA, and the allied FRSN-class platform providing an increase of approximately 75%, thereby confirming that MMRA enhance the traditional engineering and technical support system, increase operational resilience, and reduce logistical dependencies.

GENERAL CONCLUSIONS

1. Engineering and technical support in emergency and rescue activities constitutes a key factor for maintaining the operational readiness and functional reliability of engineering equipment under conditions of high dynamics, uncertainty, and limited resources, as traditional approaches to engineering maintenance do not provide the required resilience in a rapidly changing operational environment.

2. The operational capability and reliability of engineering equipment are shaped by the combined influence of technical, organisational, logistical, environmental, and risk-related factors; therefore, reliability should be regarded as an integral characteristic of the entire system of engineering and technical support, rather than solely as a function of the mechanical condition of machinery.

3. The developed functional model of engineering and technical support, based on the integral coefficient of functional reliability K_f and the partial coefficient of operational effectiveness of mobile maintenance and repair assets K_{on} , ensures methodological coherence between the local-operational and system-level approaches to the quantitative assessment of readiness and effectiveness of engineering units.

4. The application of the proposed models to different configurations of engineering and technical support demonstrates that the implementation of mobile maintenance and repair assets leads to a substantial increase in the functional reliability of engineering equipment, expressed through reduced recovery time, decreased logistical dependencies, improved maintainability, and enhanced operational resilience, even under baseline MMRA configurations.

5. The improvement of engineering and technical support requires a systemic approach that combines targeted modernisation and optimal configuration of mobile repair assets with the implementation of unified methodologies for the assessment of functional reliability, whereby the integral coefficient K_f provides a robust basis for planning, management, and the enhancement of readiness, autonomy, and operational effectiveness of engineering units in both the short and long term.

CONCLUSION

This dissertation is focused on the enhancement of the engineering and technical support system in emergency and rescue activities through the use of mobile maintenance and repair assets (MMRA). Within the scope of the research, theoretical frameworks have been analyzed, the factors affecting the operational capability of engineering equipment have been studied, and a new approach to quantitatively assess functional reliability in a dynamic operational environment has been proposed.

The development of engineering rescue equipment has been justified, and the theoretical and organisational foundations of engineering and technical support have been clarified.

A comprehensive analysis has been carried out on the internal, external environmental, risk, and operational factors affecting the operational capability of engineering equipment, as well as on the possibilities for their assessment.

A system of indicators for assessing operational capability has been developed in the dissertation, and a mathematical model for the integral functional reliability coefficient K_f has been formulated. Its applicability has been demonstrated through comparative calculations for different configurations of the engineering and technical support system.

The results obtained indicate that the integration of MMRA into the engineering and technical support system significantly improves the operational readiness and autonomy of engineering units. The measured increase in the integral functional reliability coefficient, compared to the baseline scenario without MMRA, shows that mobile maintenance assets do not replace but enhance the traditional engineering and technical support structure, reducing

logistical dependencies, shortening equipment recovery times, and improving the resilience of engineering teams in emergency and disaster conditions.

The developed model is platform-independent and can be applied to both national MMRA systems and allied mobile repair platforms, providing a foundation for its use in international compatibility and coalition operations within NATO and the EU. This highlights the scientific value of the development and its potential for practical implementation.

Based on the conducted research and achieved results, the following main conclusions can be formulated:

- The engineering and technical support system can be enhanced through the implementation of MMRA, which increase the autonomy, operational resilience, and maintainability of engineering units.
- The proposed integral model for assessing functional reliability provides an opportunity for an objective comparative analysis of different configurations of engineering and technical support and supports decision-making in the planning of engineering and technical maintenance.
- The developed system of indicators and the methodology for their normalisation allow for numerical assessment and forecasting of the operational capability of engineering equipment, regardless of the type of MMRA platform used.
- The results confirm the hypothesis of this dissertation regarding the effect of MMRA in enhancing the engineering and technical support system and demonstrate significant practical impact on emergency and rescue operations.

As a result, the dissertation forms both scientific added value for the theory of engineering and technical support and applied value for the practice of emergency and rescue units.

The developed approaches, models, and assessments can serve as directions for further work:

- Conducting field tests of various MMRA configurations to determine real operational limitations and capabilities;
- Developing training modules and tactical procedures for using MMRA in emergency and rescue operations;
- Investigating the interaction between MMRA and other elements of engineering and technical support, including command posts, logistics units, and early warning systems.

III. CONTRIBUTIONS OF THE DISSERTATION

НАУЧНИ SCIENTIFIC CONTRIBUTIONS

1. The parameters with the strongest influence on the effectiveness of engineering and technical support (response time, maintainability, logistical autonomy, and resource provision) have been identified.

2. The established dependencies that define engineering and technical support as an integrated system, subject to technical, logistical, environmental, and operational factors, are applicable in units dealing with the aftermath of disasters and accidents.

3. A coherent methodological framework has been formulated for the implementation of the developed model in real-world structures — identification of factors → normalisation of indicators → calculation of K_{on} → calculation of K_f → interpretation of results for decision-making.

4. The proposed development can be used for planning, modernisation, and selection of optimal configurations of MMRA in engineering units of the Ministry of Defence, Ministry of Interior, General Directorate of Fire Safety and Protection of the Population (GDFSPP), and joint forces participating in NATO and EU operations.

5. The model creates the conditions for integration into digital systems for monitoring technical readiness and maintenance of engineering equipment.

SCIENTIFIC AND APPLIED CONTRIBUTIONS

1. An original mathematical model has been developed for evaluating the operational effectiveness of mobile maintenance and repair assets (MMRA), expressed through the coefficient K_{on} .

2. An original integral mathematical model for assessing the functional reliability of the engineering and technical support system has been developed, realised through the coefficient K_f .

3. The functional interrelation between the local indicator K_f , and the integral indicator K_{on} has been demonstrated, allowing for the tracking of the systemic effect of MMRA on the overall readiness of engineering equipment.

4. The models K_{on} and K_f have been experimentally applied to compare different configurations of engineering and technical support, revealing that the integration of MMRA leads to a significant improvement in the functional reliability of engineering equipment.

5. Interpretative threshold values and ranges for assessing the effectiveness of MMRA and the functional reliability of engineering and technical support have been substantiated.

PUBLICATIONS RELATED TO THE DISSERTATION:

1. Atanasov, I. "The Bulldozer Earth-Moving Machine PZM-2M, Successor of PZM-2," Proceedings of the Annual University Scientific Conference - 2024, Volume 4, Scientific Field "Technical Sciences," pp. 35-39, Publishing Complex of the National Military University "Vasil Levski," VT, 2024, ISSN 1314-1937.
2. Atanasov, I. "Armored Repair and Evacuation Machine LYNX CSV," Proceedings of the Annual University Scientific Conference - 2024, Volume 4, Scientific Field "Technical Sciences," pp. 41-44, Publishing Complex of the National Military University "Vasil Levski," VT, 2024, ISSN 1314-1937.
3. Stefanova, V., Atanasov, I. "Indicators for Assessing the Technical Effectiveness of the Engineering and Technical Support System in Emergency Rescue Operations," Proceedings of the Scientific Conference "The Near Space – Common Goal" - 2025, Volume 1, Scientific Field "Technical Sciences," pp. 264-268, Publishing Complex of the National Military University "Vasil Levski," ISSN 2815-3510.
4. Terziev, Y., Atanasov, I. "Flood Prevention," Proceedings of the Scientific Conference "The Near Space – Common Goal" - 2025, Volume 1, Scientific Field "Technical Sciences," pp. 269-275, Publishing Complex of the National Military University "Vasil Levski," ISSN 2815-3510.